

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

**Área Departamental de Engenharia de Electrónica e
Telecomunicações e de Computadores**



Detecção de Sectores Cruzados e Optimização de Cobertura em Redes LTE

Cláudio dos Santos Sala Franco

(Licenciado)

Trabalho Final de Mestrado para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia
de Electrónica e Telecomunicações

Orientador:

Prof. Dr. Pedro Manuel de Almeida Carvalho Vieira

Co-orientação:

Eng. Nuno Oliveira e Silva

Júri:

Presidente:

Prof. Dr. Mário Pereira Véstias

Vogais:

Prof. Dr. António José Castelo Branco Rodrigues

Prof. Dr. Pedro Manuel de Almeida Carvalho Vieira

Dezembro de 2014

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

**Área Departamental de Engenharia de Electrónica e
Telecomunicações e de Computadores**



Deteção de Sectores Cruzados e Optimização de Cobertura em Redes LTE

Cláudio dos Santos Sala Franco

(Licenciado)

Trabalho Final de Mestrado para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia
de Electrónica e Telecomunicações

Orientador:

Prof. Dr. Pedro Manuel de Almeida Carvalho Vieira

Co-orientação:

Eng. Nuno Oliveira e Silva

Júri:

Presidente:

Prof. Dr. Mário Pereira Véstias

Vogais:

Prof. Dr. António José Castelo Branco Rodrigues

Prof. Dr. Pedro Manuel de Almeida Carvalho Vieira

Dezembro de 2014

Agradecimentos

À Celfinet pela oportunidade de ingressar num projecto com aplicabilidade prática.

À Vodafone pela disponibilização dos dados necessários para fazer os testes numa rede real.

Ao Eng. Pedro Vieira, Eng. Nuno Oliveira e Silva e Eng. André Martins pelas incontáveis horas aplicadas ao projecto e pela ajuda indispensável prestada durante a evolução do mesmo.

Ao meu colega e amigo David Duarte pelo apoio e companhia ao longo de todo o projecto. Foi uma longa caminhada.

Aos meus pais que sem o seu apoio não chegaria tão longe na vida académica em tão curto espaço de tempo.

Abstract

Currently there are three distinct technologies operating simultaneously, the 2nd generation (2G), 3rd generation (3G) and the 4th generation (4G). However, a great effort of parameterization and optimization is needed so that they work with a target Quality of Service (QoS). Having in mind this disadvantage, a series of algorithms were created to facilitate reading and evaluating the state of the network at various levels. These algorithms were produced in the methodology of the Self-Organizing Networks (SON), which aims at improving and providing automation to a number of planning and optimization tasks. This work is divided between two algorithms, one for detecting *crossed sectors* and other that optimizes the coverage by changing *tilts* and azimuths.

The algorithms have been implemented in Visual Studio Environment, C#, in order to be integrated, as a prototype, into the tool Vismon Observer, from Celfinet. To enable the testing of the algorithms a connection to Celfinet database was implemented. In addition to the new features of the tool, Vismon Observer also allows you to view data from drive tests, and events in network and the implemented topology.

The algorithm uses an innovative crossed sector detection method taking into account the propagation loss in order to produce statistical results identifying most of the *crossed sectors* cases with a defined confidence. The coverage optimization uses a genetic algorithm to evaluate multiple stations with multiple parameters simultaneously. These two algorithms use data from drive tests and the network topology, as input parameters.

Two test scenarios for the *crossed sector* were elaborated. In the first, it is done a network analysis (all stations with data available) in order to discover possible mismatches between sectors or to detect errors. In the second scenario, it is formulated a forced mismatch of sectors to observe the operation of the algorithm and some peculiarities related to the number of *bins* after the mismatch. In optimizing the coverage algorithm, a test scenario was formulated with two stations serving a common area. An improvement in signal level RSRP in the service area, increasing the coverage area of the stations was observed.

Key Words:

Self-Organizing Networks, LTE, Coverage Optimization, *Crossed Sectors* detection, Vismon.

Resumo

Actualmente existem três tecnologias distintas a operar em simultâneo, a 2ª geração (2G), a 3ª geração (3G) e a 4ª geração (4G). No entanto, para que estas funcionem de forma correcta é necessário um grande trabalho de parameterização e optimização. Tendo essa desvantagem em mente foi idealizado a criação de uma série de algoritmos para facilitar a leitura e avaliação do estado da rede a vários níveis. Esses algoritmos foram produzidos na metodologia das *Self-Organizing Networks* (SON), que têm o objectivo de otimizar uma série de tarefas associadas ao planeamento e optimização das tecnologias. Este trabalho está dividido entre dois algoritmos, um para detectar sectores que se encontrem trocados entre si e outro que otimiza a cobertura através da alteração de *tilts* e azimutes.

Os algoritmos foram implementados no ambiente de Visual Studio, em C#, com a finalidade de ser incluídos num protótipo da ferramenta Vismon Observer, propriedade da Celfinet. Para possibilitar os testes aos algoritmos foi implementada uma ligação à base de dados da Celfinet. Para além das novas funcionalidades da ferramenta, esta também permite visualizar dados de *drive test*, eventos ocorridos na rede e a topologia implementada.

O algoritmo de *crossed sector* utiliza método inovadores baseados na contabilização da atenuação de propagação para produzir resultados estatísticos que permitem identificar a maioria dos casos de sectores cruzados com uma certeza superior a 80 %. A optimização de cobertura utiliza um algoritmo genético para avaliar múltiplas estações com múltiplos parâmetros, em simultâneo. Estes dois algoritmos têm como parâmetros de entrada os dados de *drive test* e a topologia de rede.

Foram elaborados dois cenários de teste para o *crossed sector*. No primeiro é feita uma análise à rede (todas as estações com dados de *drive test* disponíveis), de forma a descobrir possíveis trocas entre sectores ou erros de detecção. No segundo cenário é formulado uma troca de sectores forçada para observar o funcionamento do algoritmo e algumas particularidades relacionadas com quantidade de *bins* usada nos cálculos antes e depois da troca. No algoritmo de optimização de cobertura foi formulado um cenário de teste com duas estações que servem uma zona comum. Foi observado uma melhoria no *Reference Signal Recieved Power* (RSRP) na zona de serviço, aumentando a área de cobertura das estações.

Palavras Chave:

Self-Organizing Networks, LTE, Otimização de Cobertura, Detecção de *Crossed Sectors*, Vismon.

Índice

AGRADECIMENTOS	I
ABSTRACT	III
RESUMO	VII
ÍNDICE	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XV
ÍNDICE DE TABELAS	XIX
ÍNDICE DE EQUAÇÕES	XXI
ACRÓNIMOS	XXIII
INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO.....	2
1.2. MOTIVAÇÃO.....	3
1.3. OBJECTIVOS.....	3
1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO.....	4
ESTADO DA ARTE	7
2.1. LONG TERM EVOLUTION – LTE.....	8
2.1.1. Objectivos de Desempenho.....	8
2.1.2. Arquitectura de rede.....	10
2.1.3. Arquitectura de protocolos.....	13
2.1.4. Estrutura dos canais.....	16
2.1.5. Estrutura no domínio temporal (FDD & TDD).....	21
2.1.6. Técnica de transmissão em Downlink.....	22
2.1.7. Técnica de transmissão em Uplink.....	24
2.1.8. Reference Signals.....	25
2.1.9. Sincronização.....	26
2.1.10. System Information Broadcast.....	27
2.1.11. Procedimento de Acesso Aleatório.....	28
2.1.12. Tecnologia MIMO.....	29
2.1.13. KPIs Relevantes.....	31
2.2. SELF-ORGANIZING NETWORKS (SON).....	32
2.2.1. Áreas das SON.....	32
2.2.2. Evolução das SON segundo o 3GPP.....	33
2.2.3. Área SON – Self Optimization.....	34
2.3. ALGORITMOS DE OPTIMIZAÇÃO DE COBERTURA.....	37
2.3.1. Hill Climbing.....	38

2.3.2.	Simulated Annealing	39
2.3.3.	Algoritmo Genético.....	39
IMPLEMENTAÇÃO DE ALGORITMOS DE DE CROSSED SECTOR E OPTIMIZAÇÃO DE		
COBERTURA	41	
3.1.	INTERFACE VISION	42
3.1.1.	Separadores e suas funções.....	42
3.1.2.	Algoritmo de Crossed Sector	45
3.1.3.	Algoritmo de Optimização de cobertura	46
3.2.	ALGORITMO DE DETECÇÃO DE SECTORES CRUZADOS.....	47
3.2.1.	O algoritmo	47
3.3.	ALGORITMO DE OPTIMIZAÇÃO DE COBERTURA – ALGORITMO GENÉTICO	50
3.3.1.	Conceitos e Estrutura.....	51
3.3.2.	Codificação dos Indivíduos	53
3.3.3.	População Inicial	55
3.3.4.	Avaliação da Adaptação.....	55
3.3.5.	Seleccção	57
3.3.5.1.	Método da Roleta:.....	58
3.3.6.	Cruzamento (Crossover)	59
3.3.6.1.	Blending Crossover para números reais:	59
3.3.7.	Mutação.....	60
3.3.8.	Elitismo	61
3.3.9.	Crítérios de Convergência.....	61
RESULTADOS		63
4.1.	ALGORITMO DE CROSSED SECTOR	64
4.1.1.	Cenário de teste – Portugal Continental.....	64
4.1.1.1.	Crossed Sector Real – Site_CrossedSector 1.....	65
4.1.1.2.	Área de cobertura mal definida – Site_CrossedSector 2	68
4.1.2.	Cenário de teste – Crossed Sector forçado na estação Site_CrossedSector 3	71
4.2.	ALGORITMO DE OPTIMIZAÇÃO DE COBERTURA	77
4.2.1.	Cenário de teste – Site_Cobertura 1 e Site_Cobertura 2.....	77
4.2.1.1.	Parâmetros iniciais utilizados	78
4.2.1.2.	Análise à Optimização de Cobertura	79
4.2.1.3.	Análise à Optimização do nível de sinal RSRP.....	81
4.2.1.4.	Análise conjunta por distância	82
CONCLUSÕES E PROPOSTA DE TRABALHO FUTURO.....		85
5.1.	CONCLUSÕES.....	86
5.2.	PROPOSTAS DE TRABALHO FUTURO	87
5.2.1.	Algoritmo de Crossed Sector	87
5.2.2.	Algoritmo de Optimização de Cobertura	87

Índice de Figuras

FIGURA 2.1 – ARQUITECTURA DE REDE DO LADO E-UTRAN [4].	10
FIGURA 2.2 – PLANO DE UTILIZADOR E PLANO DE CONTROLO NA E-UTRAN [3].	11
FIGURA 2.3 – REPRESENTAÇÃO DO EPC COM TODOS OS SEUS ELEMENTOS. [6].	13
FIGURA 2.4 – ARQUITECTURA SINTETIZADA DOS PROTOCOLOS DE REDE [1].	14
FIGURA 2.5 – ESTRUTURA DOS CANAIS DIVIDIDOS POR CANAIS LÓGICOS, DE TRANSPORTE E FÍSICOS [3].	16
FIGURA 2.6 – RANDOM ACCESS PREAMBLE [7].	20
FIGURA 2.7 – REPRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA DE UMA FRAME FDD [3].	21
FIGURA 2.8 – REPRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA DE UMA FRAME TDD [9].	22
FIGURA 2.9 – REPRESENTAÇÃO DE UM RB NO ESPECTRO [3].	23
FIGURA 2.10 – REPRESENTAÇÃO DO OFDMA NO TEMPO E NA FREQUÊNCIA. [2].	23
FIGURA 2.11 – ATRIBUIÇÃO DE RECURSOS EM UPLINK [3].	25
FIGURA 2.12 – REPRESENTAÇÃO DOS REFERENCE SIGNALS PARA 1, 2 E 3 ANTENAS DE TRANSMISSÃO. [3] [10].	26
FIGURA 2.13 – REPRESENTAÇÃO DOS DOIS TIPOS DE REFERENCE SIGNAL PRESENTES EM UPLINK [3].	26
FIGURA 2.14 – PASSOS NO PROCEDIMENTO DE ACESSO ALEATÓRIO [14].	29
FIGURA 2.15 – REPRESENTAÇÃO DO SISO, MISO, SIMO E MIMO [16].	31
FIGURA 2.16 – GRÁFICO TEMPORAL DAS ESPECIFICAÇÕES LTE LANÇADAS PELO 3GPP E ENQUADRAMENTO DAS RELEASES NA TECNOLOGIA [21] [22].	33
FIGURA 3.1 – SEPARADOR DO VISION: THEMATIC MAPS.	43
FIGURA 3.2 – SEPARADOR DO VISION: EVENTS.	44
FIGURA 3.3 – INTERFACE DO VISION PARA VERIFICAÇÃO DO CROSSED SECTOR.	45
FIGURA 3.4 – INTERFACE VISION PARA A OPTIMIZAÇÃO DE COBERTURA.	47
FIGURA 3.5 – REPRESENTAÇÃO DA FORMA DE RECOLHA E AVALIAÇÃO DE CADA MEDIDA, DE FORMA A CONTRIBUÍREM PARA O AZIMUTE VIRTUAL.	49
FIGURA 3.6 – REPRESENTAÇÃO DO AZIMUTE REAL VS VIRTUAL, SENDO O VIRTUAL REPRESENTADO A AZUL E O REAL A PRETO.	49
FIGURA 3.7 – ESQUEMA REPRESENTANDO AS FASES DO ALGORITMO GENÉTICO. [28].	52
FIGURA 3.8 – CROSSOVER ORIGINAL DO ALGORITMO GENÉTICO VS CROSSOVER UTILIZADO NESTE TRABALHO.	53
FIGURA 3.9 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO BLENDING CROSSOVER PARA $a = 0$ E $a > 0$ RESPECTIVAMENTE. [31].	60
FIGURA 3.10 – MUTAÇÃO DO INDIVÍDUO “IND 1” EM 3 DAS SUAS 5 PARCELAS.	60
FIGURA 4.1 – RESUMO DOS RESULTADOS DECORRENTES DA ANÁLISE A PORTUGAL CONTINENTAL.	64
FIGURA 4.2 – REPRESENTAÇÃO DOS SECTORES E MEDIDAS DA ESTAÇÃO SITE_CROSSEDSector 1.	66
FIGURA 4.3 – HISTOGRAMA DA ESTAÇÃO SITE_CROSSEDSector 1 PARA OS PARES DE SECTORES 0-1, 0-2, 1-2 RESPECTIVAMENTE.	66
FIGURA 4.4 – DIAGRAMAS DE DECISÃO DO ALGORITMO PARA A ESTAÇÃO DE SITE_CROSSEDSector 1. OS PARES DE SECTORES APRESENTADOS SÃO O 0-1, 0-2, 1-2 RESPECTIVAMENTE.	67

FIGURA 4.5 – NÍVEL DE CONFIANÇA DA DECISÃO PARA A ESTAÇÃO SITE_CROSSEDSector 1. OS PARES DE SECTORES APRESENTADOS SÃO O 0-1, 0-2, 1-2 RESPECTIVAMENTE.	68
FIGURA 4.6 – REPRESENTAÇÃO DOS SECTORES E RESPECTIVAS MEDIDAS DA ESTAÇÃO DE SITE_CROSSEDSector 2.	69
FIGURA 4.7 – HISTOGRAMA DA ESTAÇÃO SITE_CROSSEDSector 2, PARA OS PARES DE SECTORES 147-148, 147-149 E 148-149.	70
FIGURA 4.8 - DIAGRAMAS DE DECISÃO DO ALGORITMO PARA A ESTAÇÃO SITE_CROSSEDSector 2. OS PARES DE SECTORES APRESENTADOS SÃO O 147-148, 147-149 E 148-149 RESPECTIVAMENTE.....	70
FIGURA 4.9 – AVALIAÇÃO DO PAR DE SECTORES 148-149 DA ESTAÇÃO DE SITE_CROSSEDSector 2.....	71
FIGURA 4.10 - NÍVEL DE CONFIANÇA DA DECISÃO PARA A ESTAÇÃO SITE_CROSSEDSector 2. OS PARES DE SECTORES APRESENTADOS SÃO O 147-148, 147-149 E 148-149 RESPECTIVAMENTE.....	71
FIGURA 4.11 – REPRESENTAÇÃO DA AVALIAÇÃO INICIAL DOS SECTORES DA ESTAÇÃO SITE_CROSSEDSector 3 E DOS BINS QUE SÃO SERVIDOS POR CADA UM DOS TRÊS SECTORES.....	72
FIGURA 4.12 – HISTOGRAMA E RELATÓRIOS DE ESTATÍSTICA E DE DECISÃO DO ALGORITMO PARA UM CASO ONDE NÃO EXISTE CROSSED SECTOR. SECTORES 0-1, 0-2 E 1-2 RESPECTIVAMENTE. ESTAÇÃO DE SITE_CROSSEDSector 3.....	73
FIGURA 4.13 – REPRESENTAÇÃO DE UM CROSSED SECTOR PARA A ESTAÇÃO DE SITE_CROSSEDSector 3.	74
FIGURA 4.14 – FENÓMENO DA FALTA DE MEDIDAS NUM CENÁRIO DE CROSSED SECTOR FORÇADO.....	75
FIGURA 4.15 - HISTOGRAMA E RELATÓRIOS DE ESTATÍSTICA E DE DECISÃO DO ALGORITMO PARA UM CASO DE CROSSED SECTOR. SECTORES 0-1, 0-2 E 1-2 RESPECTIVAMENTE. ESTAÇÃO DE SITE_CROSSEDSector 3.....	76
FIGURA 4.16 – RELATÓRIO EM EXCEL DE CROSSED SECTOR FORÇADO ENTRE OS SECTORES 0 E 1 DA ESTAÇÃO DE SITE_CROSSEDSector 3.	77
FIGURA 4.17 – RESULTADOS DA OPTIMIZAÇÃO DE COBERTURA PARA AS ESTAÇÕES DE SITE_COBERTURA 1 E AVEIRO SITE_COBERTURA 2.	80
FIGURA 4.18 – REPRESENTAÇÃO DA MELHORIA DE SINAL RSRP ATRAVÉS DA OPTIMIZAÇÃO DE COBERTURA.	81
FIGURA 4.19 – ALTERAÇÕES NO NÍVEL DE SINAL PARA DISTÂNCIAS ATÉ 500 M, 1000 M, 2000 M E SUPERIORES A 2000 M DE UMA ESTAÇÃO.....	83
FIGURA 4.20 – CDF DE MELHORIA CONSEGUIDA PELO ALGORITMO DE OPTIMIZAÇÃO DE COBERTURA.	84
FIGURA 7.1 – REPRESENTAÇÃO DO DIAGRAMA DE RADIAÇÃO A 3D E A 2D (HORIZONTAL E VERTICAL) [32].....	92
FIGURA 7.2 – REPRESENTAÇÃO DO TILT MECÂNICO E ELÉCTRICO RESPECTIVAMENTE [33].	93
FIGURA 7.3 – EXEMPLO DO FENÓMENO DE PATTERN BLOOMING [33].	93
FIGURA 8.1 – ARQUITECTURAS SON: CENTRALIZADA, DISTRIBUÍDA E LOCALIZADA.	94
FIGURA 9.1 – REPRESENTAÇÃO DA FORMA DE RECOLHA E AVALIAÇÃO DE CADA MEDIDA, DE FORMA A CONTRIBUÍREM PARA O AZIMUTE VIRTUAL.	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
FIGURA 9.2 – REPRESENTAÇÃO DO AZIMUTE REAL VS VIRTUAL, SENDO O VIRTUAL REPRESENTADO A AZUL E O REAL A PRETO.	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
FIGURA 9.3 – ORGANOGRAMA DOS MÉTODOS DO ALGORITMO DE CROSSED SECTOR.	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
FIGURA 9.4 – REPRESENTAÇÃO DE UMA ESTAÇÃO QUE SE ENCONTRA EM ACEITÁVEIS CONDIÇÕES DE FUNCIONAMENTO.	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
FIGURA 9.5 – REPRESENTAÇÃO DE UMA ESTAÇÃO QUE POSSUI UM PAR DE SECTORES EM CROSSED SECTOR.	ERROR!

BOOKMARK NOT DEFINED.

FIGURA 10.1 – REPRESENTAÇÃO DO MÉTODO DE SELECÇÃO POR TORNEIO.	98
FIGURA 11.1 – CROSSOVER DE UM E DOIS PONTOS DE CORTE. [28]	100
FIGURA 11.2 – CROSSOVER UNIFORME. [28]	100

Índice de Tabelas

TABELA 2.1 - REQUISITOS DE DÉBITO E EFICIÊNCIA ESPECTRAL EM LTE [2].	9
TABELA 2.2 – DIVISÃO DOS CANAIS FÍSICOS EM UPLINK E DOWNLINK E POR CANAIS DE TRANSPORTE OU CONTROLO [7].	20
TABELA 2.3 – VANTAGENS E DESVANTAGENS DA TECNOLOGIA DE ACESSO OFDM [3].	24
TABELA 3.1 – CÁLCULO DAS DIFERENÇAS DE GANHO E POTÊNCIA PARA OS SETORES 0 E 1 DO SITE 1. ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.	
TABELA 3.2 – TERMINOLOGIAS UTILIZADAS NOS ALGORITMOS GENÉTICOS. [28]	51
TABELA 3.3 - MÉTODO DE SELECÇÃO DA ROLETA.	58
TABELA 4.1 – ESTAÇÕES REPORTADAS COMO ESTANDO EM CROSSED SECTOR NO TESTE A PORTUGAL CONTINENTAL	65
TABELA 4.2 - CARACTERÍSTICAS DAS ANTENAS DO CENÁRIO DE TESTE DE OPTIMIZAÇÃO DE COBERTURA	78
TABELA 4.3– PARAMETRIZAÇÃO DOS VALORES UTILIZADOS NO TESTE AO ALGORITMO DE OPTIMIZAÇÃO DE COBERTURA.	78
TABELA 4.4 – VALORES DE <i>TILT</i> INICIAL E OPTIMIZADO.	79

Índice de Equações

EQUAÇÃO (2.1) - <i>Cálculo do PCI através do PSS e do SSS</i>	27
EQUAÇÃO (3.1) - <i>Calculo do azimute virtual</i> -----	48
EQUAÇÃO (3.2) - <i>Codificação de N indivíduos</i>	54
EQUAÇÃO (3.3) - <i>Calculo da precisão binária de um elemento</i>	54
EQUAÇÃO (3.4) - <i>Representação de um individuo na forma decimal</i>	55
EQUAÇÃO (3.5) - <i>Metodos que compõem a função de fitness do algoritmo</i>	56
EQUAÇÃO (3.6) - <i>Probabilidade de um individuo ser escolhido na selecção</i>	58
EQUAÇÃO (3.7) - <i>Calculo do primeiro Elemento da nova geração</i>	59
EQUAÇÃO (3.8) - <i>Calculo do segundo Elemento da nova geração</i>	59
EQUAÇÃO (3.9) - <i>Variável de cruzamento do metodo de Crossover</i>	59
EQUAÇÃO (7.1) - <i>Directividade de uma antena</i>	90
EQUAÇÃO (7.2) - <i>Eficiência da Antena</i>	90
EQUAÇÃO (7.3) - <i>Ganho relativo de uma antena</i>	90

Acrónimos

2G	2ª Geração
3G	3ª Geração
4G	4ª Geração
3GPP	Third Generation Partnership Project
AM	Acknowledged Mode
AMC	Adaptive Modulation and Coding
ANR	Automatic Neighbour Relation
ARQ	Automatic Repeat reQuest
BCCH	Broadcast Control Channel
BCH	Broadcast Channel
C-RNTI	Cell Radio Network Temporary Identity
CAPEX	Capital expenditures
CCCH	Common Control Channel
CPICH RSCP	Common Pilot Channel Received Signal Code Power
CS	Circuit Switch
DCCH	Dedicated Control Channel
DL-SCH	Downlink Shared Channel
DRS	Demodulation Reference Signal
DT	Drive Test
DTCH	Dedicated Traffic Channel
E-UTRAN	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network
EMS	Element Management System
EPC	Evolved Packet Core

EPS	Evolved Packet System
FDD	Frequency Division Duplex
GERAN	GSM EDGE Radio Access Network
GSM	Global System for Mobile Communications
GUTI	Globally Unique Temporary Identity
HARQ	Hybrid-ARQ
ICIC	Inter-Cell Interference Coordination
IMSI	International mobile Subscriber Identity
IP	Internet Protocol
IP	Internet Protocol
ISI	Inter-Symbol Interference
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium Access Control
MBMS	Multimedia Broadcast Multicast Services
MBSFN	Multicast-Broadcast Single-Frequency Network
MBSFN	Multicast-Broadcast Single-Frequency Network
MCCH	Multicast Control Channel
MCH	Multicast Channel
MCH	Multicast channel
MIB	Master Information Block
MME	Mobility Management Entity
MRC	Maximum Ratio Combining
MRO	Mobility Robustness Optimization
MTCH	Multicast Traffic Channel
NAS	Non-access stratum

OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
OPEX	Operational expenditure
P-GW	Packet Data Network Gateway
PCCH	Paging Control Channel
PCH	Paging Channel
PDCP	Packet data Convergence Protocol
PDN	Packet Data Network
PDU	Protocol Data Unit
PPT	PCI Planning Tool
PRB	Physical Resource Block
PS	Packet Switch
PS	Packet Switch.
QoS	Quality of Service
QAM	Quadrature amplitude modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RACH	Random Access Channel
RE	Resource Element
RLC	Radio Link Control
RRC	Radio Resource Control
RSRP	Reference Signal Recieved Power
S1-MME	S1 control plane
S1-U	S1 user plane
SAE	System Architecture Evolution
SDU	Service Data Unit

SG-W	Serving GW
SIBs	System Information Blocks
SRS	Sounding Reference Signal
TA	Tracking Area
TAI	TA Identifier
TAU	TA Updates
TB	Transport Blocks
TCP	Transmission Control Protocol
TDD	Time Division Duplex
TDD	Time Division Duplex
TM	Transparent Mode
TTI	Transmission Time Interval
UDP	User Datagram Protocol
UE	User Equipment
UL-SCH	Uplink Shared channel
UL-SCH	Uplink Shared Channel
UM	Unacknowledged Mode
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
VoIP	Voice over IP
X2-AP	X2 Application Protocol
X2-C	X2 control plane
X2-U	X2 user plane

Capítulo 1

Introdução

O capítulo introduz a parte teórica do trabalho. É explicitado, para começar, qual o enquadramento no universo actual das telecomunicações. Não menos importante, é abordada a motivação para realização deste trabalho tal como a estrutura que existe no mesmo, de forma a facilitar a sua leitura.

1.1. Enquadramento

Das tecnologias actualmente usadas o 2G foi a primeira a ser implementada, em 1992, sendo esta a primeira a encriptar as conversações de forma digital e oferecer serviços de dados e mensagens SMS. Anos depois foi implementada a rede 3G oferecendo ritmos mais elevados de transferência de dados e chamadas de vídeo. Por fim, e mais direccionada com o estudo realizado neste trabalho, foi implementada a rede 4G com inúmeras melhorias principalmente a nível dos ritmos de transferência de dados.

Para manter todos estas três tecnologias a funcionar em paralelo é necessário um grande empenho e atenção às inconsistências e erros que surgem diariamente. Para melhorar a rapidez de análise e resolução de problemas foram criadas ferramentas que ajudam os engenheiros e técnicos nos seus serviços diários. Actualmente, existem mecanismos que tornam certos parâmetros da rede auto optimizáveis.

A dissertação é focada na tecnologia 4G, que tal como as tecnologias precedentes possui problemas de sectores trocados e de zonas com falta de cobertura. Para resolver tais problemas as ferramentas vão sendo melhoradas constantemente e, no caso deste trabalho, trata-se de o surgimento de mais um algoritmo de apoio que visa ajudar na detecção de situações de *crossed sector* e optimização de cobertura através alterações nos *tilts* e azimutes das antenas, deixando a decisão final sempre a cargo do engenheiro de rádio.

O algoritmo de *crossed sector* vai tirar partido da fórmula de Friss e de uma metodologia baseada na diferença de ganhos para fazer uma detecção precisa dos sectores com problemas. O algoritmo de optimização de cobertura usa como base um algoritmo genético para modificar múltiplos parâmetros (*tilt*, azimute) de múltiplos sectores em simultâneo. Através da modificação desses parâmetros é possível a melhoria de cobertura e de nível de sinal.

1.2. Motivação

O conceito de otimizar uma rede de telecomunicações está directamente ligado a mecanismos morosos e complexos.

Duas das ferramentas essenciais para facilitar de quem esteja a implementar/otimizar uma rede rádio são a detecção de sectores cruzados (*crossed sectors*) e a optimização dos parâmetros das antenas de forma a melhorar a cobertura da zona. Isto somado à crescente complexidade e quantidade de dados a avaliar em todas as três tecnologias, torna o desenvolvimento de ferramentas como esta imperativo. De uma perspectiva mais minuciosa, se um engenheiro quisesse detectar um *crossed sector* teria de avaliar inúmeros parâmetros manualmente, tais como o *handover*, a cobertura e a parametrização das antenas. Na optimização observa-se uma situação idêntica, onde se teriam inúmeras variáveis de entrada e de saída, tornando impossível um planeamento mais alargado (com múltiplas estações/sectores) sem ajuda de uma ferramenta especializada.

O principal desafio é desenvolver uma ferramenta única e intuitiva que permita ao seu utilizador ganhar uma ajuda valiosa nas suas tarefas do dia-a-dia.

1.3. Objectivos

Tendo em conta os problemas inerentes à avaliação e optimização das redes móveis, foi pensado numa ferramenta que pudesse dar o apoio necessário tanto a nível da implementação como a nível da avaliação e optimização. Desta forma foi criado o Vismon, propriedade da Celfinet, que tem em vista uma eficiência e eficácia maior através do apoio prestado ao Engenheiro.

Neste trabalho, será realizada a algoritmia necessária para incluir novas aplicações espelhadas num novo separador para esta ferramenta. Numa primeira fase será implementado um algoritmo que tem como objectivo a detecção de *crossed sector*. Esta é uma situação que sem auxílio de uma ferramenta é difícil de detectar apesar de originar problemas bastante sérios na rede, que degradam a qualidade de serviço oferecida ao utilizador final. Numa segunda parte do trabalho, será abordado um

algoritmo de optimização de cobertura que tem o objectivo de melhorar o nível de sinal na área seleccionada permitindo uma melhor cobertura a dispositivos móveis que se encontrem mais afastados de uma estação base.

O algoritmo de *crossed sector* será baseado em estimação de cobertura e propagação rádio. Quanto ao algoritmo de cobertura, vai tirar partido das vantagens associadas aos algoritmos genéticos para conseguir atingir uma optimização considerável.

Na utilização da ferramenta é possível uma compreensão dos problemas existentes na rede, através da avaliação de relatórios produzidos tanto em Excel como em Google Earth.

1.4. Organização do Relatório

O relatório está organizado da seguinte forma:

- Capítulo 1 – Introdução: O capítulo introduz a parte teórica do trabalho. É explicitado, para começar, qual é o enquadramento no universo actual das telecomunicações. Não menos importante, é abordada a motivação para realização deste trabalho tal como a estrutura que existe no mesmo, de forma a facilitar a sua leitura.
- Capítulo 2 – Estado da Arte: Este capítulo foca-se na introdução à tecnologia *Long Term Evolution* (LTE), sobre o qual este trabalho foi desenvolvido. Inicialmente são abordadas as vantagens do LTE sobre outras tecnologias, a arquitectura de rede, os canais existentes, modulação, antenas e todas as outras características inerentes ao LTE. Numa segunda parte do capítulo são introduzidas as redes SON, que foram desenvolvidas com o intuito de melhorar a rede através de 3 passos: o *self-configuration*, *self-healing* e o *self-optimization*.
- Capítulo 3 – Implementação de Algoritmos de *Crossed sector* e Optimização de Cobertura: Este capítulo é dedicado a todos os aspectos de implementação dos algoritmos, técnicas e ideias aplicadas. A divisão é feita entre dois algoritmos: o algoritmo de detecção de *crossed sector* e o algoritmo de optimização de cobertura através do *tilt/azimute*. O

algoritmo de detecção de *crossed sector* foca-se na utilização dos ganhos provenientes do diagrama de radiação e nas medidas de RSRP de cada *bin*, enquanto o algoritmo de optimização de cobertura é baseado em algoritmos genéticos de forma a encontrar uma óptima solução para múltiplos parâmetros de entrada.

- Capítulo 4 – Resultados: Neste capítulo são apresentados os resultados de alguns cenários de teste formulados para o algoritmo de *crossed sector* e de optimização de cobertura. No *crossed sector* são apresentados três cenários: um com *crossed sector* real, outro com *crossed sector* forçado e um terceiro com a área de cobertura mal definida, originando problemas. No caso da optimização de cobertura é apresentado um cenário de teste com duas estações base. É verificado no teste a melhoria tanto a nível de cobertura, como de nível de sinal em zonas já cobertas.
- Capítulo 5 – Conclusões e Propostas de Trabalho Futuro: Este capítulo é dedicado ao resumo das conclusões obtidas a partir do desenvolvimento de um algoritmo de detecção de *crossed sector* como do algoritmo de optimização de cobertura. Numa segunda parte deste capítulo, são apresentadas propostas de trabalho futuro.
- Capítulo 6 – Referências: Neste capítulo estão apresentadas as referências que foram consultadas no decorrer deste trabalho.
- Capítulo 7 – Anexos: O capítulo contém informação adicional que não foi incluída nos capítulos anteriores.

Capítulo 2

Estado da Arte

Este capítulo foca-se na introdução à tecnologia *Long Term Evolution* (LTE), sobre o qual este trabalho foi desenvolvido. Inicialmente são abordadas as vantagens do LTE sobre outras tecnologias, a arquitectura de rede, os canais existentes, modulação, antenas e todas as outras características inerentes ao LTE. Numa segunda parte do capítulo são introduzidas as redes SON, que foram desenvolvidas com o intuito de melhorar a rede através de 3 passos: o *self-configuration*, *self-healing* e o *self-optimization*.

2.1. Long Term Evolution – LTE

A tecnologia conhecida como LTE começou a ser desenvolvida em 2004 pelo *Third Generation Partnership Project (3GPP)*. Este sistema evoluiu a partir de uma tecnologia conhecida por *Universal Mobile Telecommunication System (UMTS)*. Esta nova tecnologia, cuja rede de acesso rádio é conhecida como *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN)*, tem como principais objetivos melhorar substancialmente o *ritmo de transmissão*, a capacidade e reduzir a latência. Desta forma, é possível fornecer uma melhor experiência de mobilidade para o utilizador final. No entanto, estes desenvolvimentos não seriam possíveis sem a existência do *Internet Protocol (IP)*, que foi escolhido como meio de transporte para todo o tráfego da rede. [1] [2] [3].

2.1.1. Objectivos de Desempenho

O LTE está direccionado para fornecer um suporte de qualidade para serviços em *Packet Switch (PS)*, tais como, navegar na internet, *Voice over IP (VoIP)*, jogos online e *streaming* de vídeo. Para esse fim, a tecnologia foi desenhada de forma a possuir um elevado débito binário, combinado com uma latência bastante baixa. Estes requisitos foram formalizados no início da uniformização, em 2004 pela 3GPP e podem ser sumarizados nos seguintes pontos:

- Ritmo de transmissão: Tendo em conta um utilizador padrão, o ritmo de transmissão é 3 a 4 vezes melhor em *downlink* e 2 a 3 vezes melhor em *uplink*. Isto tendo como fonte de comparação o *3GPP Release 6*.
- Eficiência espectral: Tal como no *ritmo de transmissão*, em *downlink* tem uma melhoria de 3 a 4 vezes e em *uplink* de 2 a 3 vezes em comparação com as normas no *3GPP Release 6*.

Na Tabela 2.1 é sumarizado o débito e a eficiência espectral requerida no LTE.

Tabela 2.1 - Requisitos de Débito e eficiência espectral em LTE [2].

Downlink (20 MHz)			Uplink (20 MHz)		
Unidade	Mbps	Bps/Hz	Unidade	Mbps	Bps/Hz
Requerimento (Min)	100	5.0	Requerimento (Min)	50	2.5
2x2 MIMO	172.8	8.6	16 QAM	57.6	2.9
4x4 MIMO	326.4	16.3	64 QAM	86.4	4.3

- Latência (do ponto de vista do utilizador): O tempo máximo decorrido entre colocar as informações na rede e estas estarem disponíveis no seu destino final não deve exceder os 30 ms.
- Latência (do ponto de vista do plano de controlo): É o tempo máximo necessário para transferir um dispositivo móvel do estado passivo (IDLE) para o estado activo (CONNECTED). O valor padrão é de 100 ms.
- Interacção com outras tecnologias: A interacção com redes *GSM EDGE Radio Access Network / UMTS Terrestrial Radio Access Network* (GERAN/UTRAN) e com outras tecnologias não incluídas no 3GPP está assegurada. Os *handovers* entre tecnologias, para serviços em tempo real, têm um máximo de 300 ms entre (E-UTRAN) / (GERAN/UTRAN) e de 500 ms para serviços que não sejam em tempo real.
- Largura de Banda: A tecnologia suporta várias de larguras de banda : 1.4, 3, 5, 10 e 20 MHz.
- Custos: Há uma redução nos custos de *Capital expenditures* (CAPEX) e *Operational expenditure* (OPEX) em relação a *3GPP releases* anteriores.
- Mobilidade: O sistema está adaptado para garantir um bom QoS para baixas velocidades de movimentação (0-15 km/h). No entanto, também

é assegurado serviço aos utilizadores que viagem a velocidades elevadas, incluindo comboios de alta velocidade.

- Alocação de Espectro: É possível a utilização de *Frequency Division Duplex* (FDD) e *Time Division Duplex* (TDD).
- Qualidade de Serviço: A qualidade de serviço até ao utilizador final é suportada e deve ser garantida a um nível tão bom ou melhor que aquela encontrada no tráfego de voz de uma rede *circuit switch* (CS) em UMTS.

2.1.2. Arquitectura de rede

No LTE, os serviços são unicamente comutados por pacotes, o que requer algumas mudanças a nível de arquitectura comparativamente com tecnologias anteriores. Em tecnologias anteriores eram suportadas por CS ou por CS e *packet switch* (PS). O novo modelo é designado por *Evolved Packet System* (EPS), que engloba a evolução a nível da rede, agora designada por E-UTRAN e a evolução a nível do core, designado por *Evolved Packet Core* (EPC).

Na Figura 2.1 é possível observar o esquema a nível da rede (E-UTRAN).

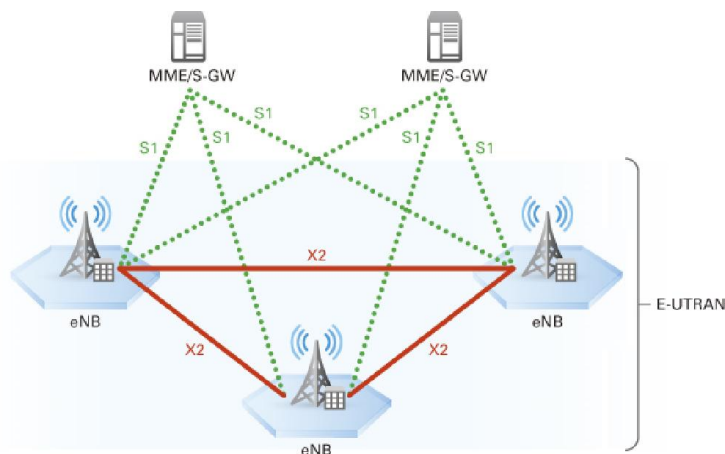


Figura 2.1– Arquitectura de rede do lado E-UTRAN [4].

O E-UTRAN só possui um elemento, o eNB, que é responsável por toda a comunicação efectuada entre o EPC e os dispositivos móveis. O seu componente proporciona à rede um ponto de ligação entre o plano de utilizador, o plano de controlo e o *User Equipment* (UE). A estação base que é usada no LTE tem melhorias significativas em relação às anteriores, principalmente a nível do controlo de

movilidade, controlo de admissão, controlo de portadora, escalonamento de pacotes em *uplink* e *downlink* e configuração de medidas. O eNB possui 2 funções principais a desempenhar:

- Enviar e receber transmissões rádio de e para todos os dispositivos móveis, usando funções de processamento de sinal, tanto digital como analógico;
- Controlar as operações de baixo nível de todos os dispositivos móveis, enviando mensagens de sinalização tal como mensagens de *handover*.

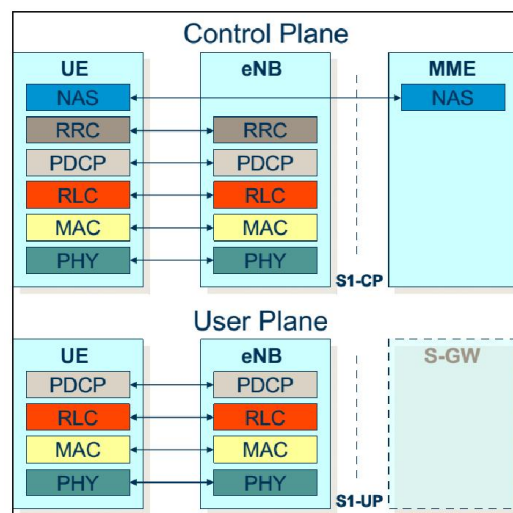


Figura 2.2 – Plano de utilizador e plano de controlo na E-UTRAN [3].

As interfaces de comunicação são parte fundamental do sistema para que exista troca de informação, começando pela S1 que é necessária para garantir a comunicação ao EPC. Esta é subdividida em duas, uma que trata da comunicação com o *S1 control plane* (S1-MME) e outra que trata do *S1 user plane* (S1-U). No caso do S1-MME, os procedimentos que desempenha são ao nível da portadora, do *handover*, da sinalização *Non-access stratum* (NAS) e do *paging*. Por outro lado o S1-U tem a obrigação de tratar do transporte de pacotes entre o eNB e a *Serving GW* (SG-W). A outra interface, designada de X2, garante a comunicação entre eNBs. A estrutura é idêntica ao S1, dividindo-se entre *X2 control plane* (X2-C), *X2 user plane* (X2-U) e o *X2 Application Protocol* (X2-AP). No caso do X2-U tem a função de transportar os pacotes de dados entre os eNB, sendo apenas usada por períodos limitados de tempo. O X2-C possui um número limitado de funções de sinalização que ajudam no *handover* e na troca de informação contextual de utilizadores entre eNBs. Para além destas duas vertentes da

interface X2, ainda existe o X2-AP que tem como principal objectivo suportar o controlo de capacidade e a coordenação de *handovers* [1] [2] [5].

Progredindo na direcção do *core* da rede, designado por EPC (Figura 2.3), encontram-se os seguintes elementos e suas respectivas funções:

- *Mobility Management Entity (MME)*: É a entidade responsável pela autenticação e atribuição de recursos ao UE quando este se conecta pela primeira vez à rede. Para além disso, garante uma segurança adicional através da atribuição de uma identidade temporária denominada de *Globally Unique Temporary Identity (GUTI)*, que descarta a necessidade de usar o *International mobile Subscriber Identity (IMSI)*. Outra das responsabilidades do MME é a de estabelecer os recursos que serão usados pelo UE. Também está envolvido na sinalização de controlo para o *handover* [5];
- *Serving Gateway (S-GW)*: Esta entidade está envolvida na gestão de canal do UP, esta só pode manipular os seus próprios recursos e a pedido do MME, P-GW ou PCRF. Todas as ligações dos S-GW são *multicast*, ou seja, um S-GW pode estar a servir apenas uma zona geográfica em particular com apenas alguns eNBs [5];
- *Packet Data Network Gateway (P-GW)*: É uma entidade que pode ser vista como o *router* fronteira entre o EPS e o E-UTRAN. Executa funções de filtragem e de encaminhamento de tráfego. Normalmente atribui um endereço IP ao UE para que este consiga comunicar com a rede. A entidade também é responsável por executar o *Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP)* [5];
- *Policy and Charging Resource Function (PCRF)*: É o elemento responsável pelo *Policy and Charging Control (PCC)*. Toma as decisões de como devem ser manipulados os serviços em termos de QoS, além de fornecer informação ao *Policy and Charging Enforcement Function (PCEF)* (localizado no P-GW) e ao *Bearer Binding and Event Reporting Function (BBERF)* (localizado no S-GW), para que as devidas portadoras e policiamento sejam estabelecidos [5];

- Home Subscription Server (HSS): No HSS está contida toda a informação relacionada com o utilizador, isto é, guarda uma cópia do perfil do utilizador que contém a informação sobre que serviços estão associados aquele utilizador. Para além disso, também grava a localização do utilizador a nível do nó de controlo (ex.: MME). Outra importante funcionalidade é a de guardar as identidades dos P-GWs em utilização. Um elemento que normalmente está associado ao HSS é o *Authentication Center (AuC)* que tem armazenadas chaves que permitem encriptar os dados e mante-los íntegros na sua viagem pela rede [5].

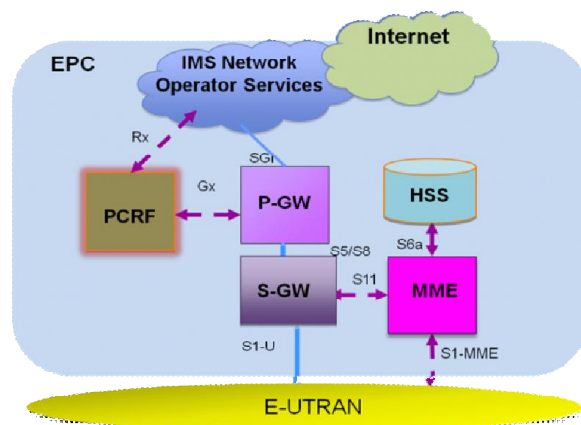


Figura 2.3 – Representação do EPC com todos os seus elementos. [6]

2.1.3. Arquitectura de protocolos

A arquitectura de protocolos em LTE pode ser separada em dois planos distintos. Um é o plano de utilizador, onde são criados pacotes de dados que serão processados por protocolos como o *Transmission Control Protocol (TCP)*, *User Datagram Protocol (UDP)* e o *Internet Protocol (IP)*. O outro é o plano de controlo, onde o protocolo *Radio Resource Control (RRC)* cria as mensagens de sinalização que são trocadas entre o eNB e o UE. Em ambos os casos, a informação será processada pelos protocolos *Packet data Convergence Protocol (PDCP)*, *Radio Link Control (RLC)* e *Medium Access Control (MAC)* antes de ser enviada para a camada física para ser transmitida.

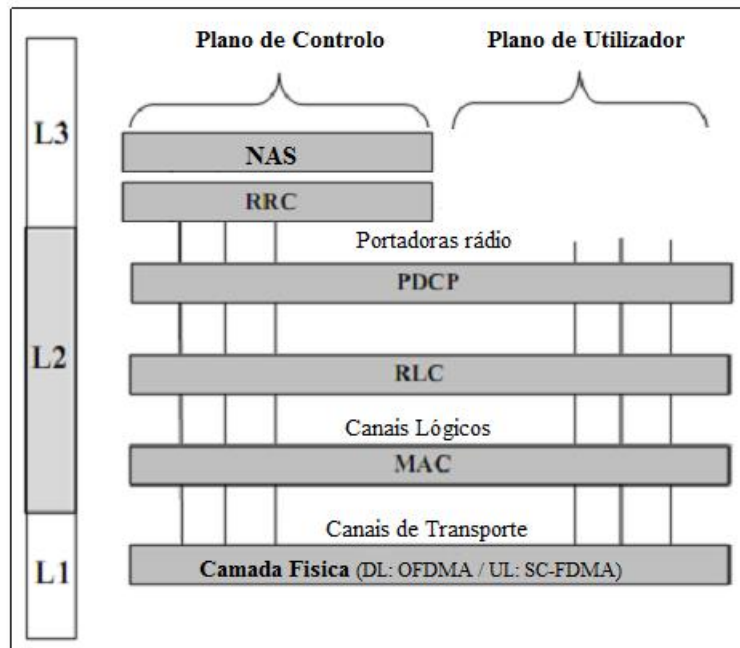


Figura 2.4 – Arquitectura sintetizada dos protocolos de rede [1].

De seguida, os protocolos são identificados e descritos em maior detalhe. A ordem pela qual são apresentados está de acordo com a Figura 2.4, começando a partir da camada mais alta para a mais baixa (camada física):

- Non-Access Stratum (NAS): Estas mensagens são transportadas sob a camada RRC, sendo concatenadas com mensagens RRC padrão ou em mensagens RRC dedicadas. As mensagens possuem cifragem e protecção de integridade. As funções do NAS são as de gerir a mobilidade dos UE em estado *idle*, a autenticação do UE e a portadora EPS. Também tem a seu cargo a configuração e controlo de segurança e a iniciação de *paging* para UEs no estado *idle* [3].
- Radio Resource Control (RRC): O RRC está situado na camada 3 da rede. As suas principais funções são a de fazer *broadcast* da informação relacionada com o *access stratum*, o *non-access stratum*, *paging*, estabelecimento, manutenção e libertação das conexões entre o UE e o E-TRAN, estabelecimento, manutenção e libertação de ligações ponto a ponto de portadoras rádio, funções de mobilidade várias, notificação e estabelecimento, configuração e manutenção de portadoras para serviços *Multimedia Broadcast Multicast Services* (MBMS), funções de manutenção de QoS, reportar medidas do UE e controlo dessas

informações reportadas, controlo no MBMS e transferência directa de mensagens entre NAS e UE [3].

- *Packet Data Convergence Control (PDCP)*: É um protocolo da camada 2 que fornece serviços tanto ao RRC como ao NAS, no UE ou na retransmissão no eNB. Mais especificamente, as suas funções resumem-se à transferência de dados (plano de controlo e/ou utilizador), à compressão de cabeçalho e descompressão de fluxos de dados IP, à manutenção de *PDCP sequence numbers* e à eliminação de duplicados de *Service Data Unit (SDU)*s de camadas inferiores quando existe *handover* para portadoras que estejam mapeadas em modo *RLC acknowledged mode*. Também é responsável pela cifragem dos dados no plano de utilizador e de controlo e pela protecção de integridade dos dados no plano de controlo e na entrega de *Protocol Data Unit (PDU)*s a camadas superiores quando se dá o *handover* [3].
- *Radio Link Control (RLC)*: Possui três modos de operação, o *Unacknowledged Mode (UM)*, o *Acknowledged Mode (AM)* e o *Transparent Mode (TM)* que são configurados por portadora. Em suma a camada RLC é responsável pela transferência de PDUs de camadas superiores, correcção de erros através do *Automatic Repeat reQuest (ARQ)* (modo AM) e concatenação, segmentação e reconstrução de RLC SDUs (modos AM e UM). Para além destas ainda é responsável pela re-segmentação dos dados dos RLC PDUs (modo AM), reordenação dos dados dos RLC PDUs (modos AM e UM), detecção de duplicados (modos AM e UM), descartar RLC SDUs (modos AM e UM), restabelecimento do RLC e detecção de erros no protocolo (modo AM) [3].
- *Medium Access Layer (MAC)*: Esta camada de nível 2 é responsável por mapear os canais lógicos e de transporte, multiplexar / desmultiplexar os MAC SDUs em *Transport Blocks (TB)* para serem depois entregues à camada física, corrigir erros através do *Hybrid-ARQ (HARQ)* e fazer priorização dos canais lógicos. [1]
- *Camada Física*: É a camada de nível mais baixo (nível 1) que transporta toda a informação que provem dos canais de transporte do MAC para a interface rádio. Tem a seu cuidado o *Adaptive Modulation and Coding*

(AMC), o controlo de potência, a pesquisa das células por razões de sincronismo e *handover*. [1]

2.1.4. Estrutura dos canais

Os fluxos de informação existentes entre protocolos são designados por canais. Em LTE são usados diversos canais, com funções que se distinguem pelo tipo que informação que transportam e pela forma que a informação é processada. Estes canais são divididos em 3 categorias: canais lógicos, canais de transporte e canais físicos.

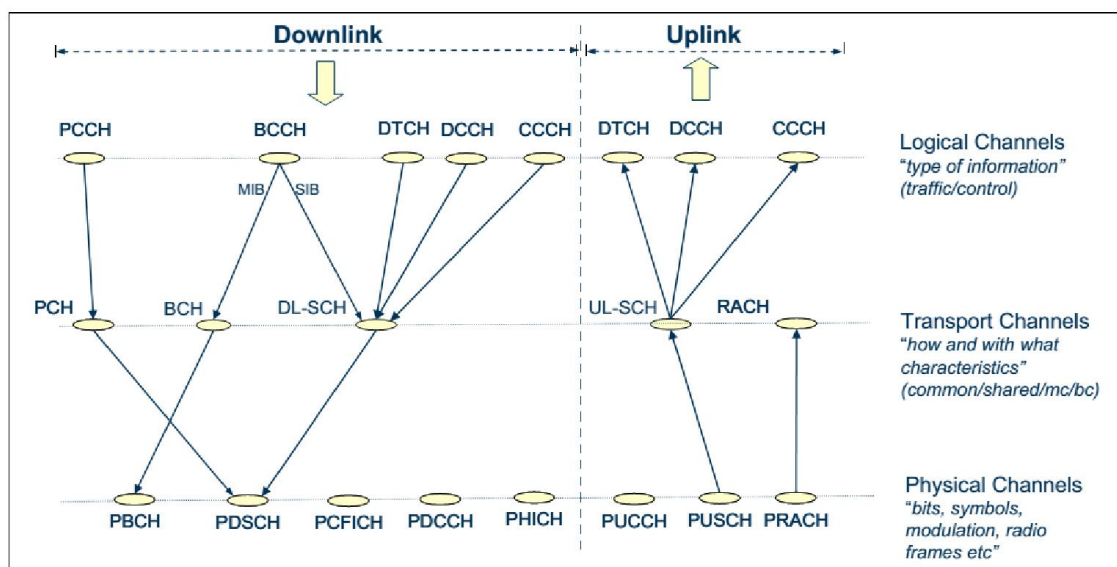


Figura 2.5 – Estrutura dos canais divididos por canais lógicos, de transporte e físicos [3].

Canais Lógicos

Estes definem que tipo de dados está a ser transmitido, tal como os serviços de transferência de dados oferecidos pela camada MAC. Mensagens ao nível da sinalização / dados são transportadas por estes canais entre os protocolos de RLC e MAC. Os canais lógicos são divididos em canais de controlo e canais de tráfego, sendo que os de controlo transportam dados no plano de controlo e os canais de tráfego no plano de utilizador. Estes canais podem ainda ser subdivididos em canais comuns ou dedicados, a diferença entre eles é que num canal comum os dados são comuns a todos os utilizadores de uma célula (Ponto-Multiponto) enquanto num canal dedicado só um utilizador é servido (Ponto-a-Ponto) [1].

Os canais lógicos são identificados de seguida com todas as suas funções (quando não for especificado, o canal tanto pode ser em *downlink* como em *uplink*):

- Broadcast Control Channel (BCCH): É um canal de *downlink* com o objectivo de fazer o *broadcast* de informação de controlo [3];
- Paging Control Channel (PCCH): É um canal de *downlink* que transfere a informação de *paging*. Este é usado quando a rede desconhece a localização do UE [3];
- Common Control Channel (CCCH): Canal usado pelos UEs que não possuem uma ligação RRC com a rede, ou seja, será usado pelos UEs quando estão a aceder a uma nova célula ou após uma re-selecção de célula [3];
- Multicast Control Channel (MCCH): É um canal de *downlink* e ponto-multiponto usado para transmitir o escalonamento das mensagens de MBMS e informações de controlo a partir da rede para o UE, tanto para um ou para vários *Multicast Traffic Channel* (MTCH). Depois de estabelecer uma ligação RRC este canal é apenas usado pelos UEs que recebem MBMS [3];
- Dedicated Control Channel (DCCH): É um canal ponto-a-ponto que transmite informação de controlo entre o UE e a rede, partindo do princípio que o UE tem uma ligação RRC [3];
- Dedicated Traffic Channel (DTCH): É um canal ponto-a-ponto dedicado que serve para a transferência da informação de utilizador [3].
- Multicast Traffic Channel (MTCH): É um canal de *downlink* e ponto-a-ponto que serve para transmitir o tráfego de dados entre a rede e o UE, usando para isso o MBMS [3].

Canais de Transporte

Os canais de transporte definem a forma como os dados são enviados. As mensagens de dados e de sinalização são enviadas por estes canais entre as camadas MAC e física. Em LTE foi feito um esforço para que estes canais fossem reduzidos ao mínimo indispensável, já que em UMTS as trocas de mensagens entre canais causam uma perda de tempo [3].

De seguida estão apresentados todos os canais de transporte:

- Broadcast Channel (BCH): É um canal de *broadcast* que cobre toda a área de uma célula, tem um débito binário baixo e fixo para garantir que

todos os UEs recebam a informação livre de erros. A recepção deste é obrigatória para se conseguir aceder a qualquer serviço dentro de uma célula [3].

- Downlink Shared Channel (DL-SCH): É um canal que faz *broadcast* em toda a célula (*beamforming* pode ser aplicado). Tem a possibilidade de usar HARQ. É uma ligação que pode se adaptar simplesmente variando a modulação, codificação ou potência transmitida. Este é o principal canal usado na transferência de dados em *downlink* [3].
- Paging Channel (PCH): É um canal que é transmitido em toda a célula através de *broadcast*. Serve principalmente para fazer o transporte do PCCH [3].
- Multicast channel (MCH): Este canal é transmitido por toda a área de cobertura da célula em *broadcast*. É utilizado para transportar um MBMS, no entanto também suporta a combinação de múltiplos MBMS com destino a múltiplas células, ou seja, um *multicast-broadcast single-frequency network* (MBSFN) [3].
- Uplink Shared channel (UL-SCH): É semelhante ao DL-SCH. A diferença é que está direccionado para o *uplink* [3].
- Random Access Channel (RACH): É usado para obter a sincronização temporal e para transmitir a informação necessária de forma a conseguir concessões de escalonamento. As concessões destinam-se a UEs que pretendem sincronizar-se e ligar-se a uma rede [3].

Canais Físicos

São canais usados pela camada MAC como forma de transporte. Todo o tráfego é entregue à camada física, e por sua vez aos canais físicos, na forma de blocos. Para além disso, toda a informação necessária referente à transmissão e/ou recepção de dados é fornecida à camada física pela camada MAC.

A este nível os canais podem ser divididos entre os de *uplink* e de *downlink* e subdivididos entre canais transporte e canais de controlo, sendo que os principais são os canais de transporte que fazem o transporte dos dados. No caso dos canais de controlo servem de suporte aos canais de transporte, não transportando qualquer informação.

Em suma, existem os seguintes canais na camada física:

- *Physical Broadcast Channel (PBCH)*: Este canal faz o *broadcast* de um pequeno número de parâmetros essenciais para o acesso inicial a uma célula, de entre os parâmetros consta a largura de banda de *downlink*, o indicador da estrutura de canal do *Physical Hybrid ARQ* e os 8 bits mais significativos do *System Frame Number*. Também é de referir que deve ser detectável sem conhecimento da largura de banda e acessível no limite da célula.
- *Physical Downlink Shared Channel (PDSCH)*: O PDSCH é o principal transportador de dados entre todos os canais, sendo distribuído pelos utilizadores de uma forma dinâmica. Os dados são enviados em TB que correspondem a MAC PDUs, estes são enviados da camada MAC para a física a cada *Transmission Time Interval (TTI)*, ou seja, a cada intervalo de 1 ms. Este canal também transmite informações em *broadcast* que não são transmitidas pelo PBCH, tais como *System Information Blocks (SIB)* e mensagens de *paging*,
- *Physical Multicast Channel (PMCH)*: Tem o objectivo de definir a estrutura física para transportar MBMS. Sabe-se também que o PMCH é transmitido em *subframes* específicas e dedicadas onde o PDSCH não é transmitido.
- *Physical Downlink Control Channel (PDCCH)*: A sua função é transportar a atribuição de recursos até aos UEs, sendo que estas estão contidas na mensagem de *Downlink Control Information (DCI)*. Podem ser transmitidos múltiplos PDCCHs na mesma *subframe* se se usar o *Control Channel Elements (CCE)*.
- *Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH)*: Transporta o *Control Frame Indicator (CFI)*, que contém o número de símbolos OFDM usados no controlo do canal de transmissão em cada *subframe*.
- *Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH)*: O PHICH transporta o ACK/NAK do HARQ, que indica ao UE se o eNB recebeu correctamente os dados enviados no *Physical Uplink Shared Channel (PUSCH)*.

- Physical Uplink Shared Channel (PUSCH): É o canal responsável pelo transporte de dados provenientes do UE. Para além disso também transporta informação necessária para descodificar a informação, tal como indicadores do formato de transporte e parâmetros *Multiple Input Multiple Output* (MIMO).
- Physical Uplink Control Channel (PUCCH): O PUCCH é responsável por transmitir toda a informação de controlo relevante (em *uplink*). Entre essas informações está incluído o ACK/NAK do HARQ, os indicadores de qualidade do canal (CQI), o *feedback* MIMO e os pedidos de transmissão em *uplink*.
- Physical Random Access Channel (PRACH): Este canal transporta o *Random Access Preamble*, que um UE envia para conseguir aceder à rede em modo *non-synchronized*, tornando desta forma possível a sincronização temporal entre o UE e o eNB. [7]



Figura 2.6 – Random Access Preamble [7].

Tabela 2.2 – Divisão dos canais físicos em *uplink* e *downlink* e por canais de transporte ou controlo [7].

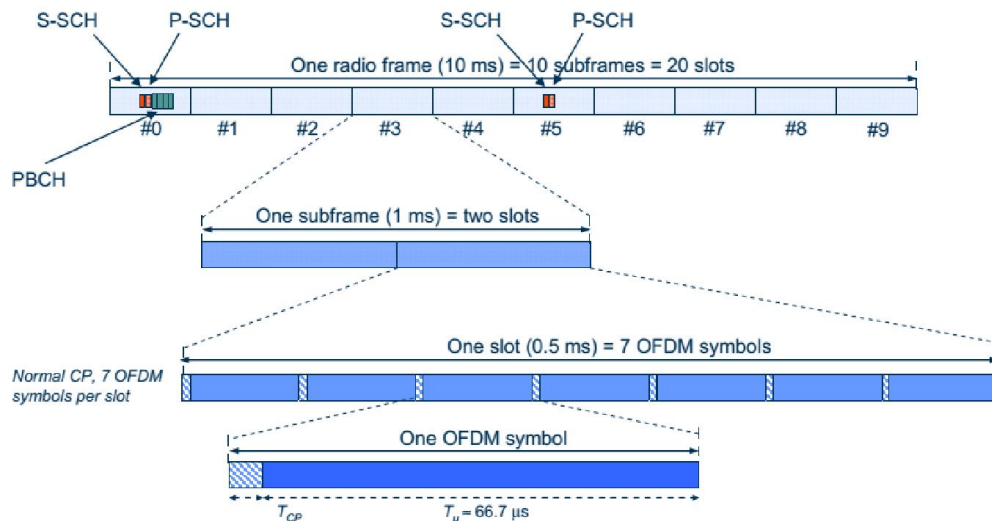
Canal	Sentido		Tipo	
	Uplink	Downlink	Transporte	Controlo
PBCH		X	X	
PDSCH		X	X	
PMCH		X	X	
PDCCH		X		X
PCFICH		X		X
PHICH		X		X

PUSCH	X		X	
PUCCH	X			X
PRACH	X			X

2.1.5. Estrutura no domínio temporal (FDD & TDD)

A tecnologia LTE foi pensada para que fosse possível o uso de *Frequency Division Duplex* (FDD), ou *Time Division Duplex* (TDD). Isto deveu-se à expectativa de que o LTE TDD e o LTE FDD fossem igualmente utilizados já que cada um tem as suas vantagens e desvantagens, que beneficiam casos particulares de uma forma única [8].

No caso do FDD, as vantagens são visíveis em cenários em que as transmissões de *uplink* e de *downlink* são simétricas (o que normalmente não é o caso em redes sobre IP, como o LTE). Um ponto bastante positivo é que quando se usa FDD, a interferência entre os sectores vizinhos é mais baixa do que quando se usa TDD. Tal como no caso da eficiência espectral, que é maior em FDD, tornando-se pelo menos nesses pontos uma mais-valia em relação ao TDD [8]. Na Figura 2.7 está representado uma *frame* FDD



- O PBCH é enviado na subframe #0, slot 1, símbolo 0-3 em 4 frames consecutivas (40 ms).
- O SCH é enviado na subframe #0 e #5, slot 0 e 10, símbolo 5-6 ou 4-5 no caso CP estendido.

exemplo.

Figura 2.7 – Representação da estrutura de uma frame FDD [3].

Quanto ao TDD, tipicamente é usado em cenários onde as transmissões de *uplink* e *downlink* são assimétricas. Assim como a transmissão e recepção é feita através de uma só frequência, a estimação de canal para o *beamforming* pode ser aplicada tanto em *uplink* como *downlink*. Por outro lado, uma desvantagem típica de usar este modo é a necessidade de incluir tempos de guarda entre as transmissões para evitar problemas de interferência [8].

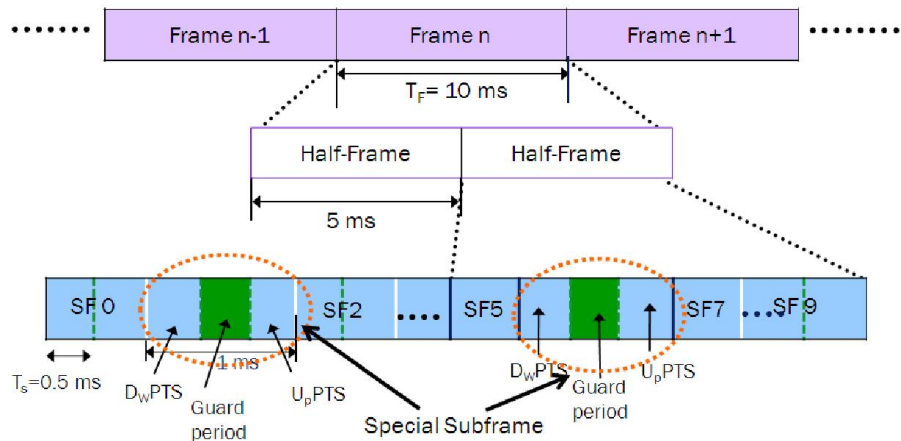


Figura 2.8 – Representação da estrutura de uma frame TDD [9].

2.1.6. Técnica de transmissão em Downlink

OFDM/OFDMA

O esquema escolhido para transmissão de dados em E-UTRAN FDD e TDD é baseado em *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* (OFDM). Com o OFDM, o espectro disponível é dividido em múltiplas sub-portadoras. Cada uma destas sub-portadoras num dado intervalo temporal é chamado de *Resource Element* (RE). Cada RE tem uma banda de 15 kHz e pode ser agregado em blocos de 84 RE, dando origem a um *Physical Resource Block* (PRB), ver Figura 2.9 [3].

Através do OFDM são conseguidos os esquemas de modulação *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK), *Quadrature Amplitude Modulation with 16 symbols* (16-QAM) e 64-QAM. Para além disso, no domínio temporal é adicionado um intervalo de guarda a cada símbolo de forma a combater o *InterSymbol Interference* (ISI), que existe devido a atrasos de multi-percurso inerentes nas comunicações. Categoriza-se de “atraso de multi-percurso” a diferença temporal entre a chegada da primeira componente de sinal e da última (geralmente é de alguns μ s). Este atraso deve-se normalmente ao

ambiente envolvente. A forma encontrada para rectificar o problema é introduzir um intervalo de guarda, que deverá ser definido com um valor maior do que o do atraso, de modo a evitar uma degradação na comunicação. Este intervalo é colocado antes de cada símbolo OFDM e também pode ser designado por *prefico cíclico*. Este pode ser observado na Figura 2.7.

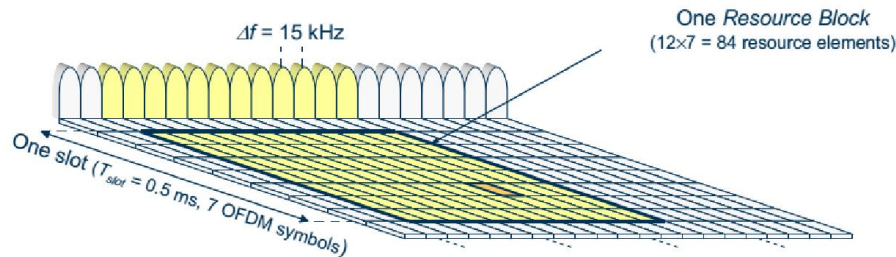


Figura 2.9 – Representação de um RB no espectro [3].

Em contraste com o OFDM, o *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access* (OFDMA) permite o acesso a vários utilizadores na banda disponível, sendo atribuído a cada um uma parcela específica dos recursos disponíveis, em domínio temporal e espectral (Figura 2.10). O princípio fundamental é a partilha dos canais de dados, ou seja, em cada *transmission time interval* (TTI) é feito um novo escalonamento de forma a alocar os recursos disponíveis aos utilizadores que necessitem. Os dados são todos transportados no canal PDSCH como explicado anteriormente. [2]

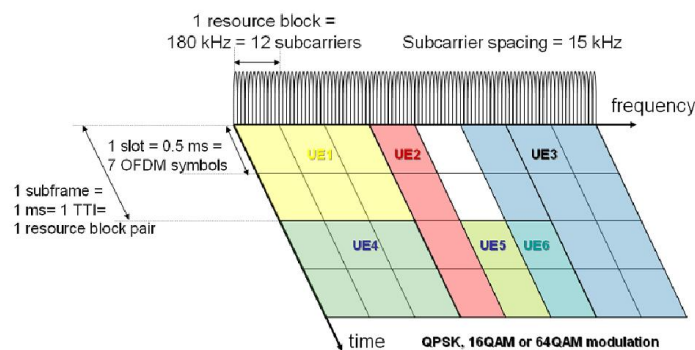


Figura 2.10 – Representação do OFDMA no tempo e na frequência. [2]

Vantagens & Desvantagens

Tabela 2.3 – Vantagens e desvantagens da tecnologia de acesso OFDM [3].

Vantagens	Desvantagens
Diversidade na Frequência	Sensível a erros de frequência e Doppler
Robusto contra o ISI	Elevado PAPR
Fácil de implementar	<i>Overhead</i>
Largura de Banda flexível	
Adaptável a MIMO	
Amplamente usado (WLAN, ADSL, etc)	

2.1.7. Técnica de transmissão em Uplink

SC-FDM/SC-FDMA

Na altura em que se concebia o LTE, foram consideradas várias alternativas para a transmissão em *uplink*. Enquanto o OFDMA é óptimo para desempenhar o papel na transmissão em *downlink*, em *uplink* não é aceitável. O problema está relacionado principalmente com o valor elevado de *Peak-to-Average Power Ratio* (PAPR) que reduz bastante a autonomia do equipamento e originaria uma má cobertura de *uplink*. O PAPR indica a amplificação do sinal de forma a garantir uma conexão entre o MS e a rede, no entanto se esta amplificação não fosse cuidadosamente limitada no MS a sua autonomia seria bastante reduzida. Desta forma foi escolhido um esquema denominado *Single Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA), este com um valor reduzido de PAPR comparado com o OFDMA, mas mantendo algumas semelhanças importantes [2].

Contrariamente ao que acontece em *downlink*, em *uplink*, os RB que são reservados para um UE devem ser sempre consecutivos no domínio da frequência. Isto é necessário para que se consiga manter a propriedade de *single-carrier* na transmissão. É de notar que, em comparação com o *downlink* os RB são definidos como 12 sub-portadoras durante um intervalo de 0.5 ms (1 slot). Estes são enviados em *sub-frames* de

1 ms, mas tal como no *downlink* a atribuição de recursos é feita em pares de RBs, onde um par consiste em dois RBs em *slots* consecutivos [3].

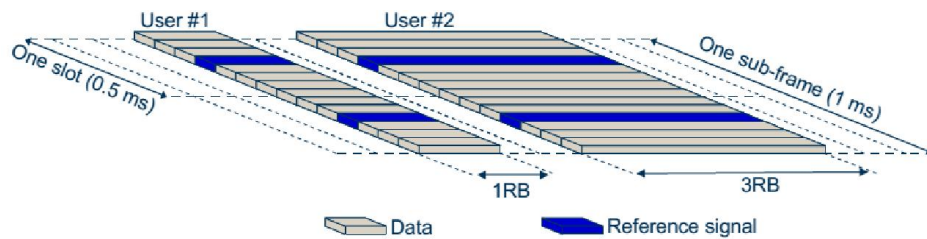


Figura 2.11 – Atribuição de recursos em uplink [3].

2.1.8. Reference Signals

Para se conseguir fazer uma desmodulação dos vários canais físicos, tanto em *downlink* como em *uplink*, os equipamentos necessitam de fazer estimação de canal. Uma forma de resolver esta situação foi inserir símbolos de referência, conhecidos e pré-definidos, na grelha de tempo-frequência do OFDM e SC-FDM [10].

Downlink

Na Figura 2.12 observa-se um exemplo da distribuição de *reference symbols* para 1, 2 e 4 antenas de transmissão. A estrutura dos símbolos varia consoante o número de antenas que estão disponíveis. Em LTE existem três tipos de sinais definidos: os *cell-specific* correspondendo cada um a um porto de uma antena, os *reference signals MBSFN* que estão contidos dentro das sub-frames de MBSFN e os *UE-specific* algumas vezes também chamados de *dedicated reference signals*. Para além destes três grupos ainda existe outra divisão, a nível do *prefixo cíclico*. No caso de ter um tempo de guarda normal, os símbolos podem ser vistos como uma combinação de uma sequência pseudo-aleatória e ortogonal, onde cada *cell ID group* (168 grupos) corresponde a um dos 168 grupos da sequência pseudo-aleatória. Por seu lado, cada um dos três *cell IDs* em cada *cell ID group* corresponde a uma de três sequências ortogonais. No caso do tempo de guarda ser estendido não há nenhuma sequência ortogonal, resultando que cada *cell ID* (504 *cell IDs*) corresponda a uma de 504 sequências pseudo-aleatórias [3].

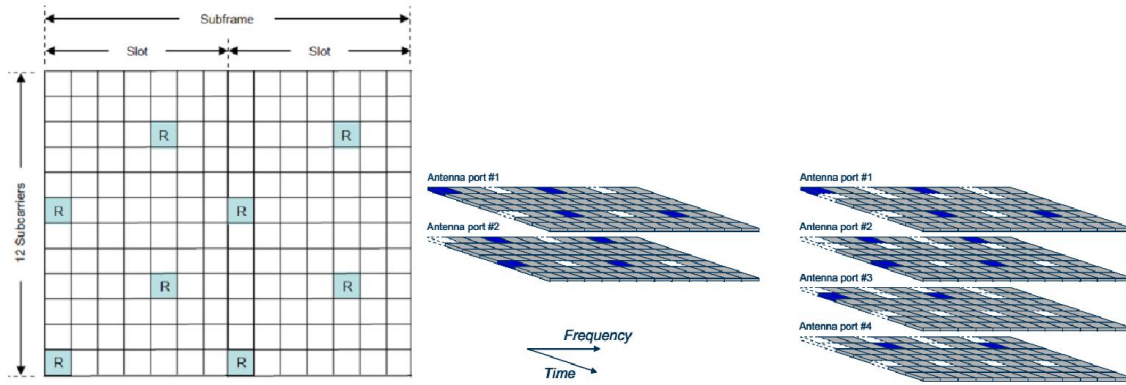


Figura 2.12 – Representação dos Reference Signals para 1, 2 e 3 antenas de transmissão. [3] [10]

Uplink

Em *uplink* o princípio de transmissão dos *reference signals* tem de ser diferente, pois as variações de potência são mais baixas. Existem dois tipos de sinais definidos: o *Demodulation Reference Signal* (DRS) que é usado para estimação de canal de forma a garantir uma boa desmodulação e o *Sounding Reference Signal* (SRS) que serve para estimar a qualidade de canal. Como se pode verificar pela Figura 2.13, o DRS é transmitido no quarto bloco de cada *slot* de *uplink* e com uma largura de banda igual à da transmissão de dados. Pode ser aplicado o *uplink frequency hopping*, implicando que dois *slots* são transmitidos em frequências diferentes. Neste caso a interpolação entre os dois blocos, com os *reference signal* de uma *sub-frame*, pode não ser possível pois a separação de frequências pode ser substancialmente elevada entre os dois blocos [3] [11].

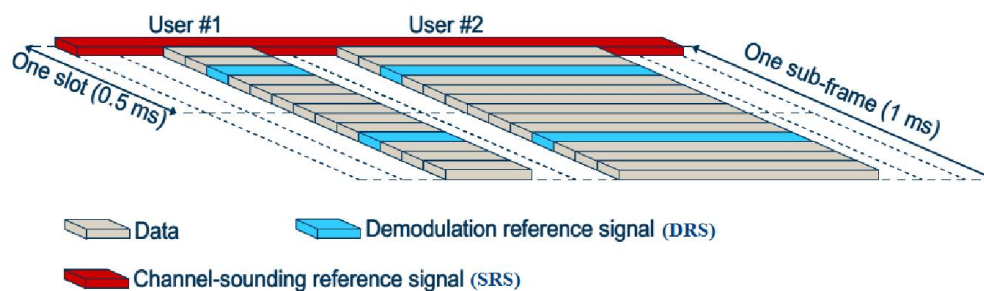


Figura 2.13 – Representação dos dois tipos de Reference Signal presentes em uplink [3].

2.1.9. Sincronização

A sincronização é o passo inicial para um UE que se pretenda ligar a uma célula. Para isso o UE adquire um *Physical Cell ID* (PCI), *time slot* e sincronização ao

nível da *frame* para que dessa forma seja possível o UE ler os *system information blocks*. [12]:

No processo o UE vai-se ajustando em diversos canais dependendo das bandas que estes suportam. Depois de ajustado numa banda/canal, o próximo passo é encontrar o *Primary Synchronization Signal* (PSS), que está localizado no último símbolo OFDM do primeiro *slot* da primeira *sub-frame* de uma *frame* rádio. Conhecido o PSS, o UE já é capaz de se sincronizar ao nível da *sub-frame*, para além de conseguir obter o *physical layer identity* (0 a 2). De seguida é necessário identificar o *Secondary Synchronization Signal* (SSS) para que seja obtido o número do *cell identity group* (0 a 167). O SSS encontra-se na mesma *sub-frame* do PSS mas no símbolo OFDM anterior. [12]:

Através do cálculo presente na equação (2.1) o EU adquire o PCI para a célula em que está situado. Tal como referido anteriormente em 2.1.8, em LTE existem 504 PCIs que são divididos entre 168 *cell identity groups* onde cada um desses grupos possui três *physical layer identity*. Depois de um UE saber o PCI de uma dada célula este também obtém a localização dos *reference signals* dessa mesma célula. A forma de calcular o PCI depois de obter todos os parâmetros necessários é [12]:

$$PCI = 3 \times SSS + PSS \quad (2.1)$$

2.1.10. System Information Broadcast

Quando os processos de procura e sincronização da célula estão concluídos, o UE necessita de adquirir informações de sistema sobre a célula a que está ligado (*cell system information*). Esta informação é repetidamente enviada em *broadcast* pela rede para todos os UEs, sendo transportada no canal lógico BCCH, que por sua vez está incluído num de dois canais de transporte: BCH ou DL-SCH. [3] [13].

O *system information* divide-se em duas componentes, uma estática e outra dinâmica. A parte estática é designada por de *Master Information Block* (MIB) e é enviada no BCH. O MIB fornece parâmetros mais importantes, como por exemplo, a largura de banda do sistema, o número de antenas, a configuração PHICH, a potência de transmissão e a informação de escalonamento sobre os *System Information Blocks* (SIBs). Quanto à componente dinâmica é conhecida como System Information Block (SIB), sendo esta mapeada em mensagens de informação de sistema *Radio Resource*

Control (RRC) no canal DL-SCH. Existem oito SIBs distintos com as seguintes funções: o SIB1 contém informação relacionada com o acesso à célula e de como os SIBs estão agendados, o SIB2 possui informação sobre os canais comuns e os canais partilhados (*common and shared channel*), o SIB3 tem a informação necessária para o UE fazer a re-selecção de célula e finalmente os SIBs de 4 a 8 contêm informação sobre as células vizinhas, tanto para LTE como WCDMA ou GSM. [3] [13].

O UE avalia a informação de sistema durante a fase em que se está a ligar a uma célula ou sempre que se quer associar a uma nova célula. Se algum valor se alterar nessa informação a rede envia um *paging* a informar o UE, para que este leia a nova informação de sistema durante o próximo ciclo de modificação. Parâmetro este que é sinalizado no SIB2 [3] [13].

2.1.11. Procedimento de Acesso Aleatório

Depois de concluídos todos os processos descritos em 2.1.8, 2.1.9 e 2.1.10 o UE vai tentar ganhar acesso à rede, para isso terá de enviar um pedido através do *shared medium*. Tal processo poderá ser feito de duas formas distintas, ou tem um procedimento que é *Contention Based* ou um que é *Contention Free*. Este procedimento é usado não só para o acesso inicial à rede mas também como parte do *handover* e do restabelecimento da sincronização em *uplink*. [14]

No procedimento *Contention Based*, é escolhido pelo UE um *random access preamble signature* aleatoriamente, sendo este passível de já ter sido escolhido. Quanto mais valores repetidos de *random access preamble signature* houver, maior é a probabilidade de existirem colisões. Desta forma, é necessário um processo subsequente que trate da resolução deste problema, sendo aplicado em todos os casos que envolvam o *random access*. No caso do *Contention Free* o eNB tem a possibilidade de prevenir o problema existente no processo anterior, alocando uma assinatura dedicada (*dedicated signature*) ao UE. Para além disso, é mais rápido que o procedimento anterior, um factor de particular importância para o *handover*, onde o tempo é crítico [10] [14].

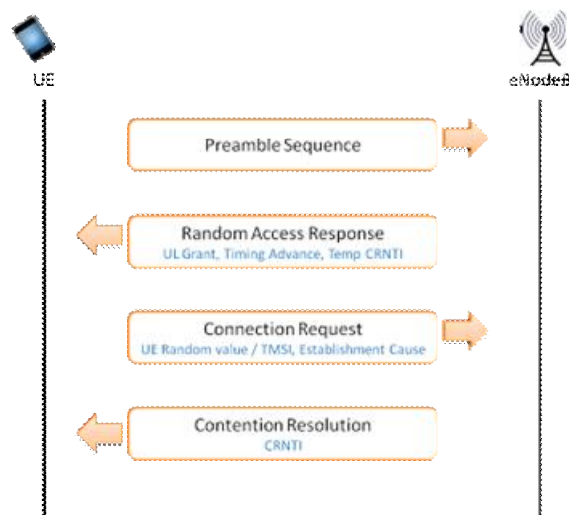


Figura 2.14 – Passos no procedimento de acesso aleatório [14].

Quando se está perante um cenário em que ocorreu uma colisão, no passo 3 (Figura 2.14), o eNB apenas irá receber a resposta de um UE ou de nenhum devido à interferência. No quarto passo, o UE, que não recebeu resposta do eNB, vai ter de reiniciar todo o processo, mas só depois de esperar até os timers do RACH expirarem [14].

2.1.12. Tecnologia MIMO

Uma das inovações que acompanhou o UMTS/LTE, com vista a melhorar o desempenho na comunicação entre UE e eNB, é a técnica de *Multiple Input Multiple Output* (MIMO). Esta técnica garante uma melhoria a nível do ritmo de transmissão e da eficiência espectral para além daquela que o OFDM já garante. No entanto, os sistemas MIMO são caracterizados por elevada complexidade, tanto em termos de processamento como de número de antenas necessárias.

Existem 4 técnicas de múltiplas antenas, sendo eles o *Single Input Single Output* (SISO), o *Single Input Multiple Output* (SIMO), o *Multiple Input Single Output* (MISO) e o MIMO referido no parágrafo anterior. O emissor é referido como Input e o receptor o output [15]. Estas técnicas estão representadas de forma gráfica na Figura 2.15.

SISO

É a forma mais simples dos quatro tipos existentes. Efectivamente este tipo funciona como qualquer canal rádio padrão, em que o emissor e o receptor possuem uma só antena. Deste modo, nenhum dos dois terá a vantagem de beneficiar de diversidade espacial mas também nenhum processamento adicional será necessário, sendo essa a sua principal vantagem. No entanto um canal SISO vai estar limitado por interferência e desvanecimento [15].

SIMO

Esta forma existe quando o transmissor possui apenas uma antena mas o receptor possui múltiplas antenas. Quando é aplicada esta configuração obtém-se diversidade na recepção. É normalmente usado de forma a conseguir que um sistema receba sinal de múltiplas fontes como forma de combater os efeitos do desvanecimento. Para além disso, tem a vantagem de ser relativamente fácil de implementar, apesar de ter alguns problemas a nível do processamento requerido no receptor. Dentro do SIMO há duas formas de utilização que se evidenciam: o *Switched diversity SIMO* que procura pelo sinal mais forte e muda a ligação para essa antena e o *Maximum Ratio Combining (MRC) SIMO* que recolhe todos os sinais e os soma para obter uma combinação [15].

MISO

O MISO, ao contrário do SIMO, garante diversidade na transmissão. De forma a obter diversidade envia dados com redundância a partir das múltiplas antenas que possui. Logo, o receptor consegue receber um sinal em melhores condições tornando mais certa a extracção dos dados com sucesso. A vantagem deste tipo de configuração é que a redundância de codificação e processamento é movida do receptor para o transmissor. Com esta configuração também é possível fazer algo denominado por *beamforming*, método este que permite que um sinal seja transmitido com maior intensidade para uma dada direcção (tipicamente a do UE) [15].

MIMO

Esta é a configuração em que são utilizadas mais do que uma antena, tanto na transmissão como na recepção. Deste modo garante uma melhoria tanto a nível de robustez de canal como de ritmo de transmissão. As vantagens de utilização do MIMO são explícitas nas configurações SIMO e MISO, no entanto o MIMO também possui a capacidade de fazer multiplexagem espacial. Este método permite criar uma série de

“pipes” de dados na interface rádio. O número máximo que é possível utilizar é igual à quantidade de antenas transmissoras/receptoras existentes. Em LTE é suportado a configuração de 2x2 ou 4x4 antenas. [3] [15]

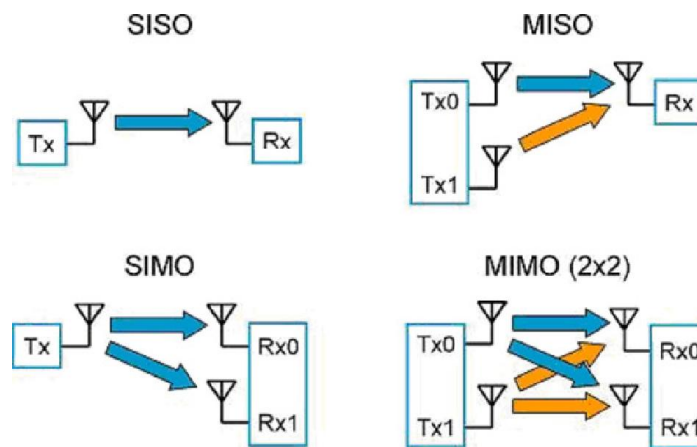


Figura 2.15 – Representação do SISO, MISO, SIMO e MIMO [16].

2.1.13. KPIs Relevantes

Os *Key Performance Indicators* (KPIs) são indicadores usados para avaliar a performance do sistema. A sua utilização tem como objectivos: [17]

- Monitorizar a rede com vista a otimizar o seu desempenho, de forma a garantir uma melhor qualidade de serviço.
- Fornecer a quem planeia a rede informação detalhada, de forma a garantir um melhor dimensionamento da rede.

No universo de parâmetros utilizados como KPI's, encontra-se um importante para este estudo, a *Reference Signal Received Power* (RSRP). Este é o parâmetro que pode ser comparável ao *Common Pilot Channel Received Signal Code Power* (CPICH RSCP) do UMTS. O RSRP é o nível potência médio de todos os REs que transportem sinais de referência numa certa largura de banda. Em paralelo com este, existe um outro parâmetro denominado de *Reference Signal Received Quality* (RSRQ). O seu objectivo é de avaliar a qualidade do sinal de referência recebido. Este parâmetro garante informação adicional caso o RSRP não seja suficiente para chegar a uma conclusão. Estes são os parâmetros que são utilizados para avaliar a cobertura [18] [19].

2.2. Self-Organizing Networks (SON)

Com o crescimento gradual das redes de acesso rádio e da necessidade de mais tráfego, torna-se evidente que a rede se vai tornando mais complicada de planear e gerir. Assim, é essencial para os operadores a introdução de funcionalidades automáticas, gradualmente mais presentes em todos os passos da construção e manutenção da rede. Desta forma consegue-se reduzir o investimento em recursos humanos e por sua vez reduzir os custos de OPEX, conseguindo em simultâneo melhorar o desempenho da rede com a alteração de algumas configurações de sistema.

A visão actual das SON é de possuir autonomia para avaliar e melhorar os parâmetros presentes na rede, minimizando a interacção humana mas não a descartando. É necessário uma supervisão cuidada às funcionalidades das SON, para, se existir alguma indecisão ou falha, esta poder ser revertida. Continua a ser responsabilidade do gestor da rede a maioria das decisões relevantes como forma de evitar erros graves.

2.2.1. Áreas das SON

No universo das SON existem três áreas principais e distintas, são elas a *Self Configuration*, *Self Optimization* e *Self Healing*:

Self Configuration: O objectivo principal é conseguir tornar as estações base em equipamentos que se auto-configurem. Este é o objectivo ideal, no entanto como objectivo progressivo espera-se conseguir que cada vez menos seja necessário a intervenção humana na configuração. Isto resulta na diminuição dos custos de instalação. Existem vários elementos de configuração incluídos nesta área das SON, sendo eles os seguintes: Configuração automática dos parâmetros rádio iniciais, Gestão do *Automatic neighbour relation* (ANR), Gestão de conectividade automática por partes de novos eNBs, auto-teste para garantir que todas as configurações estão correctas e o inventário automático, onde o eNB vai identificar as suas capacidades a nível de hardware e software [20].

Self Optimization: Depois do sistema estar montado e a funcionar é necessário aferir e otimizar o mesmo, para se obter um melhor resultado de funcionamento e satisfação dos clientes. Isto é conseguido através de algoritmos de

optimização presentes na rede. É nesta área que o trabalho em estudo foi realizado, sendo este ponto desenvolvido no capítulo (2.2.3) [20].

Self Healing: Este é um aspecto das SON que tem vindo a ganhar importância ao longo do tempo, pois através dos seus algoritmos é possível detectar e corrigir problemas na rede. Percebe-se a importância de um mecanismo que mascara e corrige automaticamente os problemas que são encontrados. As principais áreas da rede em que estas técnicas são utilizadas seguem-se: auto recuperação de software, detecção de perda de sinal por célula, e a sua recuperação e compensação [20].

2.2.2. Evolução das SON segundo o 3GPP

O conceito de SON está incluído no LTE (E-UTRAN) desde o começo e tem vindo a expandir as suas áreas e funcionalidades à medida que vão saindo novas *Releases 3GPP* [21].

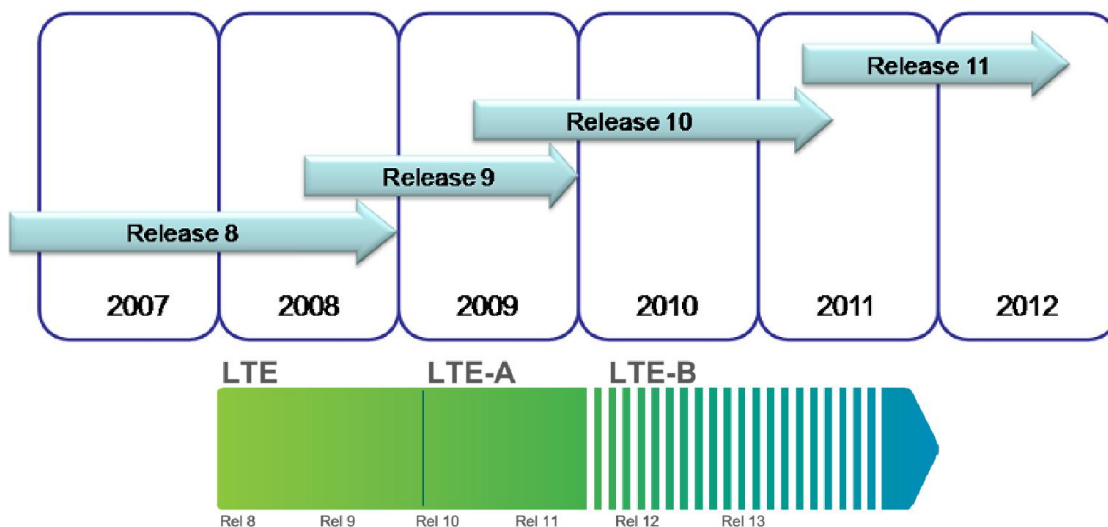


Figura 2.16 – Gráfico temporal das especificações LTE lançadas pelo 3GPP e enquadramento das Releases na tecnologia [21] [22].

O principal objectivo da uniformização por parte do 3GPP, foi o de garantir às SON a capacidade de serem usadas em redes de vários fornecedores. Assim uma das partes importantes desenvolvidas foi definir interfaces apropriadas que permitissem a troca de informações que posteriormente são usadas nos algoritmos. Apesar das especificações terem sido definidas reutilizando várias funcionalidades que existiam antes da *Release 8*, as interfaces de gestão foram definidas de uma forma genérica para

deixar aberto um caminho para a inovação. Quanto às principais funcionalidades definidas em cada uma das *Releases* estas são::

Release 8:

- ANR.
- Download de Software Automático.
- Atribuição automática de PCI.
- Inventário Automático

Release 9:

- Optimização de HO / Robustez na mobilidade.
- Optimização RACH.
- Balanceamento de Carga.
- Coordenação da interferência intercelular.

Release 10:

- Optimização de cobertura e capacidade.
- Coordenação de interferência intercelular melhorada.
- Detecção e compensação de falhas nas células.
- Funções de *Self-Healing*.
- Minimização dos *Drive Tests*.
- Poupança de Energia.

Continuarão a sair novas *Releases* com novas especificações, sendo que na *Release 11* e seguintes irão ser abordados aspectos chave relacionados com a gestão da rede, detecção e optimização *multi-layer* e redes heterogéneas *multi-RAT* [21].

2.2.3. Área SON – Self Optimization

Tal como referido em (2.2.1), a auto optimização é necessária para se conseguir obter uma melhor eficácia a partir do momento que a rede está activa. Isto é conseguido através de técnicas que analisam o desempenho da rede, fazendo posteriormente alterações que promovem a melhoria da mesma.

Existem as mais variadas razões para auto optimizar a rede, como por exemplo: crescimento da rede, introdução de novas estações-base; mudanças nas características

de propagação, tal como edifícios a serem construídos ou destruídos; mudanças no padrão de tráfego, que podem resultar de vários factores como horas de entrada e saída nos empregos, férias escolares, entre outros que façam grandes quantidades de utilizadores moverem-se de local para local; mudança na localização do eNB, menos comum de acontecer mas também um factor a ter em conta [23].

Como se pode constatar para todos estes casos é necessário uma verificação e optimização regular, que vai de encontro à necessidade de utilização desta área das SON. Para isso, existem várias funcionalidades de optimização que podem ser efectuadas, de entre elas constam as seguintes:

Automatic Neighbor Relation (ANR): Esta tem o potencial para remover ou minimizar o tratamento manual das relações de vizinhança, quando são estabelecidos novos eNBs ou optimizadas as listas de vizinhas. [21].

Planeamento das Tracking Areas (TA): Cada TA é individualmente identificada por um *TA Identifier* (TAI). Cada UE que esteja no estado *Power-ON* é mapeado em uma ou mais TAs. Estas são construídas para facilitar o procedimento de *paging*. A optimização neste campo tem o objectivo de automatizar o planeamento inicial para a escolha das TAs e monitorizar os *TA Updates* (TAU), de forma a identificar os eNBs que são mais adequados para uma mudança de TAI [21].

Planeamento do PCI: A optimização deste processo é feita na fase de configuração dos mesmos e determina os PCIs usando uma ferramenta denominada de *PCI Planning Tool* (PPT), que para além de estimar a área de cobertura para cada eNB, também cria uma margem de separação entre dois eNBs que sejam alocados com o mesmo PCI. No final da instalação, é garantido que cada eNB possui um PCI atribuído, sem ser necessária intervenção humana [21].

Optimização na robustez da mobilidade: O objectivo principal da *Mobility Robustness Optimization* (MRO) é melhorar de uma forma dinâmica o desempenho da rede a nível do *handover*, para que a experiência por parte do utilizador seja melhorada tal como a capacidade geral da rede. Isto é feito através de uma adaptação automática dos parâmetros da célula e do ajustamento dos limiares de *handover*, baseando-se no feedback gerado pelos indicadores de desempenho [21].

Balanceamento de Carga: Esta funcionalidade tem como objectivo equilibrar a carga das células, fazendo uma partilha de tráfego entre células. Este processo é extremamente importante para que o utilizador final possua uma boa qualidade na sua ligação. Quanto ao algoritmo para transferir a carga entre elementos de rede, pode incluir funcionalidades intra-portadora, inter-portadora ou até inter-tecnologia. Para além disso, este algoritmo pode ser aplicado a UEs no estado *Idle* ou *Active* [21].

Poupança de Energia: Trata-se de uma funcionalidade que vem ganhando importância cada vez mais, devido à preocupação com o ambiente e com os custos associados aos gastos de energia pelos eNB. Para fazer face aos elevados custos há portadoras (ou mesmo estações base) que são desligadas nos períodos em que é requerido pouco tráfego, deixando o seu tráfego a cargo de eNBs próximos [21].

Optimização RACH: O RACH necessita de ter uma configuração precisa, pois de outra forma pode resultar num aumento do tempo de acesso aos recursos ou até em falha do mesmo. Este problema irá afectar tanto o desempenho de *handover* como de *call setup*. Com uma parametrização adequada através de alguns algoritmos específicos, é possível minimizar o problema. Este desempenho é melhorado através da redução do tempo de conexão, *ritmo de transmissões* mais altos, e melhor cobertura. Os algoritmos conseguem balancear a atribuição de recursos rádio entre os acessos existentes, enquanto que ao mesmo tempo, tentam evitar a criação de interferência excessiva. Para manter o nível de qualidade na optimização, os algoritmos podem ser repetidos periodicamente ou continuamente [21]. Se o algoritmo for repetido continuamente garante uma optimização constante, mas para isso é necessário uma capacidade de processamento bastante elevada devido à avaliação contínua de grandes quantidades de informação. Como em maior parte dos momentos essa informação é bastante idêntica uma abordagem periódica é o mais coerente. Quanto maior for o intervalo entre duas execuções do algoritmo maior é a probabilidade de haver um aumento no tempo dos acessos.

Coordenação de interferência inter-células: Redes em que é usada a mesma frequência em várias células, como o LTE, estão acostumadas aos problemas de interferência entre células. Para reduzir este problema são usados algoritmos de *Inter-Cell Interference Coordination* (ICIC), que se baseiam numa coordenação inteligente dos recursos físicos entre as várias células vizinhas. De uma forma geral, os algoritmos

usados têm o objectivo de melhorar o SINR, sendo necessário encontrar um equilíbrio entre o *ritmo de transmissão* e o *bit rate*, principalmente no limite da célula [21].

Detecção e compensação de falhas nas células: É um serviço que garante a atenuação dos problemas inerentes a falhas num eNB, especialmente em casos onde o eNB não consegue perceber e reportar que se encontra fora de serviço. De uma forma manual o operador saberia dos problemas através do feedback dos utilizadores que estavam a ser afectados pelo problema, mas com a automatização, os problemas podem ser mitigados antes de começarem a surgir as queixas. Apesar do processo de optimização resolver o problema, é apenas uma solução temporária e que limita o nível de serviço que estava disponível naquela zona [21].

Optimização de Cobertura e Capacidade: É uma optimização típica dentro de uma rede, onde tradicionalmente é feita com base em medidas e usando ferramentas de planeamento com modelos de propagação teóricos. Para isso é necessário a recolha de uma extensa quantidade de dados incluindo estatísticas e medidas de sinal (*Drive Tests*). Ficou claro pelo 3GPP, que esta tarefa tinha de ser automatizada, de forma a planear as configurações da antena e potência de emissão e possibilitar ajustes periódicos na rede (tanto a nível de cobertura como capacidade). Como resultado dos algoritmos usados é possível reduzir os custos OPEX e melhorar o QoS do utilizador. Em consequência destes mesmos algoritmos haverá uma aproximação da cobertura óptima para cada zona e uma melhoria na capacidade [21].

2.3. Algoritmos de Optimização de Cobertura

Existem inúmeras hipóteses disponíveis no universo dos algoritmos de optimização rádio.. Neste estudo o desenvolvimento e implementação do algoritmo é uma parte essencial, para além disso é uma das partes complexas em auto optimização devido aos desafios e riscos que existem em redes reais e ao vivo. Na concepção de um algoritmo deste género são formulados alguns desafios que é necessário ter em consideração tais como [23]:

- Algoritmos baseados em tentativa-erro são inconcebíveis devido aos elevados riscos de criarem um impacto negativo no desempenho.
- Procura da melhor solução avaliando todos os dados existentes é proibitivo devido ao tempo necessário para tal operação.
- Dados de entrada corrompidos ou parcialmente incompletos podem não ser suficientes para um algoritmo correr em pleno.
- Não há uma solução ideal para todos os casos existentes na rede, podendo um algoritmo se adaptar perfeitamente a alguns casos e ter um pior desempenho noutros.

Existem vários algoritmos capazes de resolver o problema. De seguida são apresentados três deles, indicando as vantagens e desvantagens da sua utilização. [24]

2.3.1. Hill Climbing

É um algoritmo iterativo que começa com uma solução arbitrária para o problema, e a partir daí tenta encontrar uma solução melhor através de mudanças incrementais a um elemento da solução. Se a mudança produzir resultados melhores do que os actuais, é feito um novo incremento à solução encontrada. O processo vai sendo repetido até não se conseguir fazer mais melhorias [25].

O algoritmo de *Hill Climbing* é ideal para encontrar um máximo local, no entanto quando se trata do máximo global este não garante convergência. Esta característica negativa pode ser contornada usando o algoritmo repetidamente até encontrar o máximo global, usando esquemas mais complexos baseados em iterações tal como o *Iterated Local Search* ou baseados em memória como o *Tabú Search*. Uma outra alternativa seria usar um algoritmo metaheurístico como o *Simulated Annealing* [25].

Por outro lado, este algoritmo prima pela simplicidade, o que o torna muito utilizado como algoritmo de optimização para problemas simples. Ele é amplamente usado em inteligência artificial para se chegar a um estado final a partir de um nó partida. A escolha do próximo nó e do nó de partida pode ser variada para se obter uma lista de algoritmos relacionados. Apesar de haverem algoritmos mais coesos e complexos que dariam melhores resultados em muitos casos o Hill Climbing é suficiente para atingir uma solução desejada. Esta situação é observada na maior parte

dos casos em que o tempo de busca é limitado, fornecendo até melhores resultados que os restantes algoritmos. Mesmo que o algoritmo seja interrompido, este consegue produzir uma solução válida para o problema. [25]

2.3.2. Simulated Annealing

O *Simulated Annealing* é um algoritmo direccionado à procura de uma boa aproximação ao valor do máximo global de uma certa função, num universo de hipóteses muito grande. É bastante usado quando o universo de procura é discreto (Ex.: todas as rotas que visitem uma dada cidade). Para a maior parte dos problemas o *Simulated Annealing* tende a ser mais eficiente do que procurar em todas as soluções exaustivamente, tendo em consideração que o objectivo é encontrar um resultado aceitável (perto do máximo global) num certo período de tempo limitado. [26]

O nome e metodologia surgiram do processo de “recozimento” (*annealing*) que é usado em metalúrgica, esta técnica envolve o aquecimento e arrefecimento controlados para aumentar o tamanho dos cristais e reduzir os defeitos. Ambos os atributos dependem da energia termodinâmica. Enquanto a temperatura decrescesse directamente proporcional ao arrefecimento que é impelido no material, a energia termodinâmica vai decrescer mais ou menos dependendo do ritmo a que foi arrefecido, com um ritmo mais lento, o decréscimo será maior. Esta noção de ritmo de arrefecimento foi traduzida para o algoritmo de Simulated Annealing para que à medida que é procurada a solução haja um decréscimo de aceitação de más soluções. No entanto, tal como na metalúrgica, o decréscimo lento na aceitação é a chave para garantir uma busca mais extensa que não se fosse num mínimo local [26].

2.3.3. Algoritmo Genético

Num algoritmo genético, a população é composta por indivíduos, candidatos à solução mais optimizada para o problema. A evolução até encontrar a melhor solução é gradual e progride de encontro a obter gradualmente melhores soluções. Cada indivíduo tem uma série de propriedades que o caracteriza, os cromossomas, que podem ser alterados e mutados. Tradicionalmente estes indivíduos são codificados em séries de números binários, no entanto muitas outras opções estão disponíveis para utilização. O processo evolutivo começa, normalmente, com uma população inicial gerada de forma

aleatória. A população resultante de cada iteração feita no algoritmo é chamada de geração. Em cada nova geração o *fitness* de cada indivíduo da população é avaliado (o *fitness* é o valor resultante das funções objectivo presentes no algoritmo e que se pretende otimizar). Quanto melhor o *fitness* de um indivíduo maior será a probabilidade do seu material genético passar para a próxima geração. Nesse processo, são combinados dois indivíduos e possivelmente mutados. O resultado deste processo de cruzamento e mutação é então usada na próxima iteração do algoritmo. Normalmente o algoritmo termina quando se chega ao número máximo de iterações estipulado ou quando se atinge o limiar de *fitness* objectivo que foi estipulado [27].

Capítulo 3

Implementação de Algoritmos de de Crossed Sector e Optimização de Cobertura

Este capítulo é dedicado a todos os aspectos de implementação dos algoritmos, técnicas e ideias aplicadas. A divisão é feita entre dois algoritmos: o algoritmo de detecção de *crossed sector* e o algoritmo de optimização de cobertura através do *tilt/azimute*. O algoritmo de detecção de *crossed sector* foca-se na utilização dos ganhos provenientes do diagrama de radiação e nas medidas de RSRP de cada *bin*, enquanto o algoritmo de optimização de cobertura é baseado em algoritmos genéticos de forma a encontrar uma óptima solução para múltiplos parâmetros de entrada.

3.1. Interface Vismon

O Vismon é uma ferramenta desenvolvida pela Celfinet, com a função de visualização e optimização rádio. A ferramenta está direccionada para as três gerações de comunicações móveis. Esta é dividida em três separadores, cada um com a sua função específica, sendo eles o *Thematic Maps*, *Events* e *Antenna Opt*. Para a demonstração de resultados, a ferramenta conta com uma ligação com o Google Earth, para uma apreciação mais visual e com sumários em Excel, de forma a ter um relatório mais técnico das operações pedidas.

3.1.1. Separadores e suas funções

Thematic Maps:

Neste separador há várias opções disponíveis para a visualização de resultados. É possível visualizar valores de *Drive Test* (DT) como de *reports* do móvel em qualquer uma das tecnologias. Para além disso, é possível ver a qualidade de sinal, a poluição e latência causada pela piloto, entre outros parâmetros.

A nível de opções de visualização de resultados, é possível limitar a uma área específica de representação, a resolução dos pixéis, a transparência, o tipo de medidas dentro de cada opção indicada no parágrafo anterior, a data a partir do qual se quer considerar os dados, que operador se pretende e em que banda se quer definir como fonte dos dados.

Na Figura 3.1, está representado um caso que ilustra as possibilidades descritas no parágrafo anterior, tal como os resultados provenientes dessa configuração de medidas.

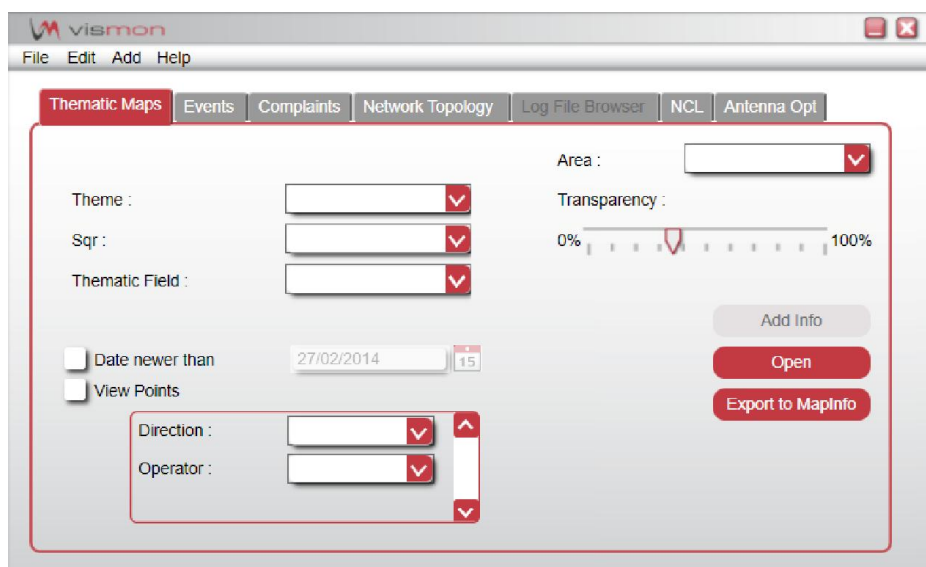


Figura 3.1 – Separador do Vismon: Thematic Maps.

Events:

Tal como o nome indica, o separador *Events* (Figura 3.2) trata de representar os eventos ocorridos em certas categorias como: Falhas de Handover, chamadas perdidas, chamadas bloqueadas, queda de chamadas, re-selecção de células e tentativas de chamadas. A forma de representação dos resultados é através do Google Earth.

Além da selecção principal dos eventos, existem outras restrições possíveis de aplicar, tais como: a data entre o qual se quer as medidas, o operador que fornece as medidas usadas, a possibilidade de títulos nos pontos e o uso da janela do mapa. Para além dessas opções mais gerais, existem ainda outras mais específicas de cada evento que fazem restrição dos dados a apresentar por as mais diversas opções. Tanto se pode especificar a causa do evento, como a rota, ou em que data foram colectados os testes, entre muitas outras opções possíveis. Posteriormente à escolha dessas opções, aparecem valores numa janela ao lado onde se poderá seleccionar os resultados pretendidos na visualização.

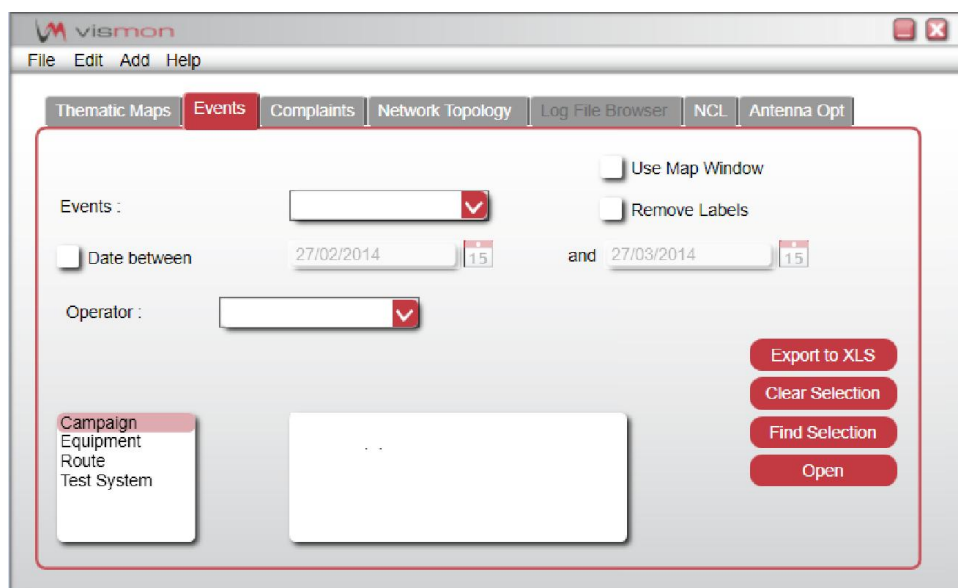


Figura 3.2 – Separador do Vismon: Events.

Antenna Opt:

O separador *Antenna Opt* será o foco principal deste projecto, tendo sido programado de raiz, tanto a nível da interface como dos algoritmos envolvidos. Este trata de otimizar os parâmetros das antenas de forma a melhorar a cobertura nas estações ou PCI's seleccionados. Para além disso, também contém a opção de detectar sectores cruzados. De momento, apenas faz este tipo de operações para a tecnologia 4G. Os resultados são mostrados no Google Earth e a um nível mais técnico num documento de Excel.

A nível de restrições possíveis de executar neste separador considera-se a resolução dos pixels, a fonte dos dados para os cálculos (*drive test*), tipo de antena em utilização e o uso do *tilt* e/ou azimute na optimização e quais os valores máximos. Num outro nível de restrição tem-se quais são as estações ou sectores que se deseja optimizar, que se pode seleccionar através do nome dos eNB ou do PCI dos sectores.

Na Figura 3.4 é apresentada a interface do separador *Antenna Opt*. Através da selecção um eNB pelo seu nome é possível verificar a existência de sectores cruzados. Este método de representação possibilita uma verificação rápida dos casos mais simples, ou seja, nos cenários onde a área de cobertura dos vários sectores está bem definida.

3.1.2. Algoritmo de Crossed Sector

No separador *Antenna Opt* encontra-se a interface que permite ao utilizador da ferramenta fazer uma detecção de *Crossed Sector*. Para isso, o utilizador necessita de seleccionar uma série de campos de forma a ser possível a utilização da ferramenta de uma forma adequada. O parágrafo que se segue é precisamente focado na forma de utilização para detectar e sugerir uma correcção para o *Crossed Sector*.

Para começar, é necessário seleccionar as bases da interface, nomeadamente em que tecnologia se quer trabalhar (*Network* – pode ser 2G, 3G ou 4G), qual a resolução dos pixéis que se vai usar nos cálculos (*Pixel Resolution* – pode ser 10 m, 100 m ou 1 km), a fonte dos dados que vão ser utilizados (*Source Calc* – pode ser *scan* de dados de DT ou dados de estatística) e, finalmente, o tipo de optimização (*Type of Optz*), neste caso *Crossed Sector*. De seguida, é preciso escolher que eNB's se pretende verificar e carregar no botão *Optimize Crossed Sector* para dar início ao processo de verificação.

Para além das opções anteriores, é possível escolher alguns parâmetros limitativos de medidas, como por exemplo: a limitação por diagrama de radiação, por diferença de ganhos e por distância máxima de um *tier*. No entanto são parâmetros opcionais para quem queira ter mais liberdade de visão sobre um problema em particular. Qualquer uma das três limitações tem definido um valor padrão que garante uma análise objectiva dos resultados.

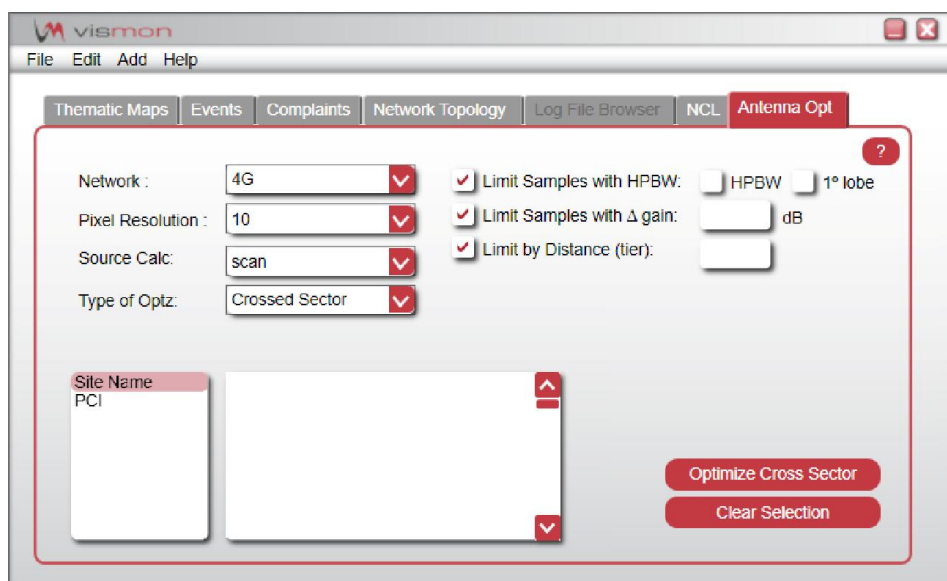


Figura 3.3 – Interface do Vismon para verificação do Crossed Sector.

3.1.3. Algoritmo de Otimização de cobertura

Para além da funcionalidade referenciada em 3.1.2, no separador de *Antenna Opt* também é possível fazer optimização de cobertura de uma ou várias estações-base em simultâneo.

Para começar, tal como na detecção de *Crossed Sector*, é necessário seleccionar as bases da interface, nomeadamente a tecnologia (*Network* – pode ser 2G, 3G ou 4G), qual a resolução dos pixéis (*Pixel Resolution* – pode ser 10 m, 100 m ou 1 km), a fonte dos dados que vão ser utilizados (*Source Calc* – pode ser *scan* de for dados de DT ou *UE* se for dados de estatística) e finalmente o tipo de optimização (*Type of Optz*), que neste caso será *Coverage*. De seguida, é preciso escolher os eNB's a optimizar, pelo seu nome e escolher se quer optimizar o *tilt* e/ou azimute (introduzindo a variação máxima possível). Finalmente basta carregar no botão *Optimize Coverage/Capacity* para dar início ao processo de optimização.

Existem também uma série de parâmetros de entrada que têm valores por defeito definidos, mas que podem ser seleccionados de forma a garantir ao utilizador uma melhor experiência de utilização da ferramenta para casos particulares em que esteja a trabalhar. Os campos são:

- O Pth (potência de *threshold*, definida a -95 dBm) que serve para assinalar o limiar a partir do qual se indica que um ponto é considerado como tendo má cobertura e ainda a variação máxima de potência para o mesmo fim.
- O “Use N° Cells” que serve para definir a partir de que quantidade de células é que se considera que há *pilot pollution* num dado *bin*.
- Os pesos atribuídos a cada método incluído na função de avaliação (*fitness*).

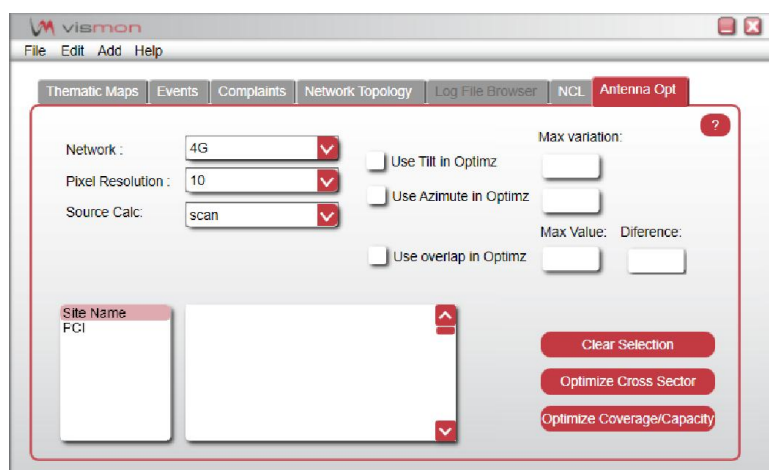


Figura 3.4 – Interface Vismon para a optimização de cobertura.

3.2. Algoritmo de Detecção de Sectores Cruzados

Nesta secção é apresentado o trabalho desenvolvido com vista à detecção e correcção do *Crossed Sector*. Este acontece quando há sectores que na sua instalação ou manutenção acabaram por alguma razão trocados entre si.

Existe uma série de problemas que resulta dessa troca de sectores. Um desses problemas é evidente se a reutilização dos PCI's for feita com sectores que estejam relativamente perto, pode vir a causar um problema grave de interferência. Outro problema é encontrado no *handover*, pois se houver uma lista de células vizinhas para o qual o dispositivo móvel deve fazer o *handover* e uma dessas células estiver em falta, o dispositivo móvel pode ter o azar de tentar ligar-se a essa célula e não conseguir. Este problema originaria quedas de chamadas naquela zona da rede.

3.2.1. O algoritmo

Existem alguns caminhos pelo qual se pode seguir de forma a detectar o *crossed sector*, no entanto no caso deste estudo, foi baseado na localização das medidas e nível de RSRP por PCI e no diagrama de radiação da antena emissora de cada sector.

Desenvolvendo a questão, numa primeira fase é necessário perceber que *bins* têm medidas e que medidas pertencem a cada sector. Essas medidas tanto provindo de um DT ou de estatísticas são extremamente importantes pois nelas reside o cerne da forma de resolver o problema. Depois de ter essas medidas divididas é calculado um azimute virtual de um sector virtual que estaria idealmente a servir aquelas medidas. A forma de calcular esse azimute virtual baseia-se no azimute de cada medida, mais um certo coeficiente de importância. Neste coeficiente está a parte principal do algoritmo, pois ele escolhe que medidas são consideradas melhores ou piores para criar o azimute virtual, e faz isso através de uma média ponderada entre o azimute, o diagrama de radiação da antena e o nível de sinal RSRP presente em cada uma das medidas em questão.

$$Azimute_{virtual} = \frac{\sum Azimute_{real} \times \left| \frac{G_{ant_{bin}}}{G_{ant_{max}}} \right| \times \left| \frac{RSRP_{bin}}{RSRP_{max}} \right|}{\sum \left| \frac{G_{ant_{bin}}}{G_{ant_{max}}} \right| \times \left| \frac{RSRP_{bin}}{RSRP_{max}} \right|} \quad (3.1)$$

, onde $G_{ant_{bin}}$ é o ganho retirado a partir do diagrama de radiação da antena para a direcção de um dado *bin*, $G_{ant_{max}}$ é o ganho máximo do diagrama de radiação, $RSRP_{bin}$ é o valor da medida de RSRP para um dado *bin* e $RSRP_{max}$ o valor máximo de RSRP encontrado de entre os *bins* de um dado PCI.

O conceito está ilustrado, para melhor compreensão, na figura 3.5. Nela consegue-se identificar as várias medidas, todas provenientes do mesmo PCI, com os seus níveis de sinal RSRP. Quanto à diferença de contribuição para o azimute virtual dos dois azimutes presentes na figura (θ, α), o que irá fornecer uma contribuição mais acentuada é o θ , pois para além de ser uma medida com melhor sinal também ela estará enquadrada (supostamente) num angulo de melhor ganho no diagrama de radiação da antena. Através de uma análise visual qualquer entendido percebia que este se trata de um caso em que pelo menos este sector não se encontra em *crossed sector*.

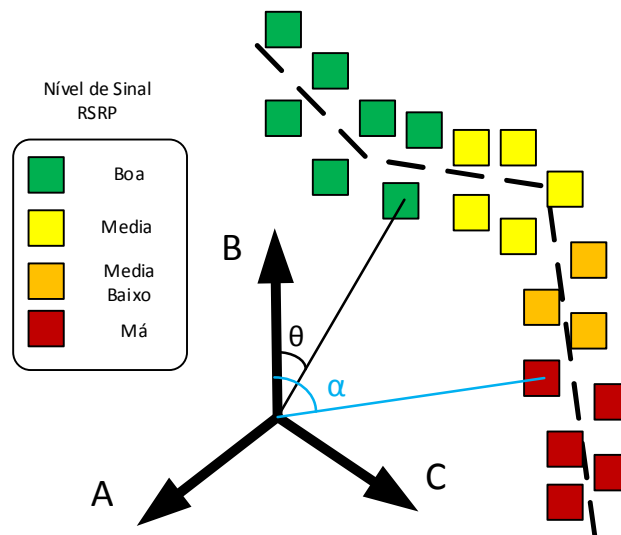


Figura 3.5 – Representação da forma de recolha e avaliação de cada medida, de forma a contribuírem para o azimute virtual.

Quanto ao resultado, depois de fazer a avaliação de todas as medidas, será algo do género do que se pode observar na figura 3.6. Onde se consegue identificar o azimute virtual e o azimute real. Percebe-se que o azimute virtual tem um ligeiro desvio em relação ao real, que muito se deve à utilização do nível de sinal RSRP para o cálculo, mas que para além de não ser crítico este desvio em algumas outras situações a utilização das medidas é importante, como por exemplo quando existe uma grande quantidade de medidas no azimute correcto mas no entanto as medidas importantes (com melhor sinal) estão no azimute inverso.

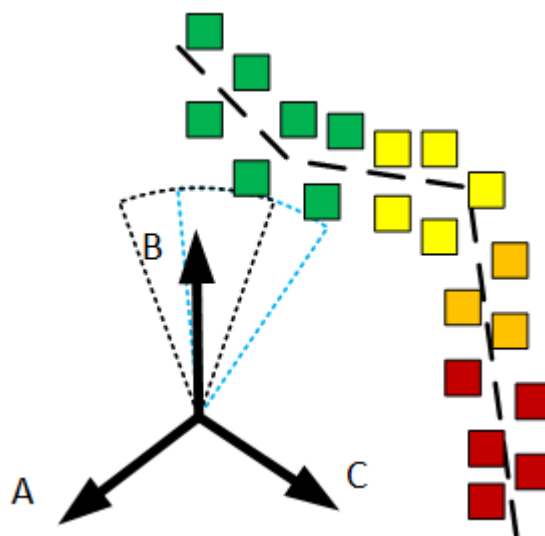


Figura 3.6 – Representação do azimute real VS Virtual, sendo o virtual representado a azul e o real a preto.

O próximo passo é a comparação dos vários sectores que foram marcados como candidatos para *crossed sector*. Mas para isso é necessário verificar quem está apto para se tornar candidato a *crossed sector*, claro que a menos que se encontre um par de sectores por estação vai ser um candidato ilegível. A forma utilizada para conseguir essa lista de candidatos passa por se fazer uma comparação entre o azimute virtual e o azimute real, concedendo uma margem igual à abertura de feixe a meia potência da antena em utilização, de forma a dar um pouco de liberdade para os casos já explicitados anteriormente em que o azimute virtual vai diferir um pouco do real.

A partir do momento que se tem a lista de possíveis pares de sectores que estão em *crossed sector*, é feita uma confirmação dos resultados. Esta confirmação é feita tanto a nível dos azimutes, se irão garantir um funcionamento correcto depois dos sectores trocados, como a nível da referência da estação, ou seja, se os sectores estão efectivamente relacionados entre si. Se tudo estiver correcto e nos conformes eles são adicionados a uma nova lista que contém as sugestões de troca. Quanto aos casos que se encontrem incorrectos para além de não se incluírem nessa mesma lista, as suas referências são retiradas das outras listas de informação que são utilizadas para construir o ficheiro de Excel.

3.3. Algoritmo de Optimização de Cobertura – Algoritmo Genético

O algoritmo genético é uma das melhores soluções existentes no campo de algoritmos de optimização. Este usa métodos que são inspirados na Teoria da Evolução de Darwin, procurando sempre a cadeia de parâmetros que tem o melhor desempenho, possuindo mecanismos para contornar os máximos locais.

A escolha do algoritmo deve-se principalmente à capacidade de resolver problemas complexos com múltiplos elementos e múltiplas soluções. Uma outra vantagem é facilidade com que podem ser implementadas as funções de avaliação de adaptação.

3.3.1. Conceitos e Estrutura

Existem diversos conceitos que devem ser elucidados de modo a perceber melhor o funcionamento do algoritmo, descritos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Terminologias utilizadas nos algoritmos genéticos. [28]

Termo	Definição
Gene	Variáveis de optimização que se apresentam de forma codificada.
Cromossoma	Conjunto ordenado de genes que caracteriza um único individuo. Possível solução para o problema.
População Inicial	Conjunto de indivíduos criados aleatoriamente e utilizados como base para o processo de busca pelo melhor resultado.
Geração	População criada a partir da população da geração anterior ou da população inicial através dos operadores genéticos.
Função de adaptação	Função usada para avaliar o individuo quanto ao seu nível de adaptação para um dado problema a optimizar.
Pais	Indivíduos da actual população que foram escolhidos para o processo de <i>Crossover</i> .
Filhos	Indivíduos da próxima geração que foram obtidos através do processo de <i>Crossover</i> .
Crossover	Processo onde à troca de informação genética dos Pais para criar uma nova geração de Filhos.
Mutação	Processo onde parte do material genético dos Filhos é alterado.
Elitismo	Processo que escolhe os melhores indivíduos e garante a sua passagem para a próxima geração de Filhos.

O procedimento dentro de um algoritmo genético consiste em gerar uma população inicial aleatória, composta pelos parâmetros a optimizar. De seguida, os

elementos dessa população são avaliados por uma função de adaptação, responsável por mostrar a adaptação de cada indivíduo e a sua potencialidade para ser escolhido como melhor candidato. Se existir uma solução, o algoritmo termina a execução e retorna o candidato, caso contrário irá correr indefinidamente ou até ser bloqueado pelo engenheiro. Para continuar para a próxima geração, pares de indivíduos da geração actual (Pais) são seleccionados e tem a probabilidade de passar pelos processos de *Crossover*, Mutação e Elitismo. Assim é criada uma população de Filhos (nova geração) que passa de novo por uma avaliação da adaptação por todo o resto dos processos até atingir o seu objectivo. Nos pontos seguintes deste capítulo será dado a conhecer, de uma forma mais pormenorizada, todos os pontos do algoritmo discutidos neste parágrafo. [28]

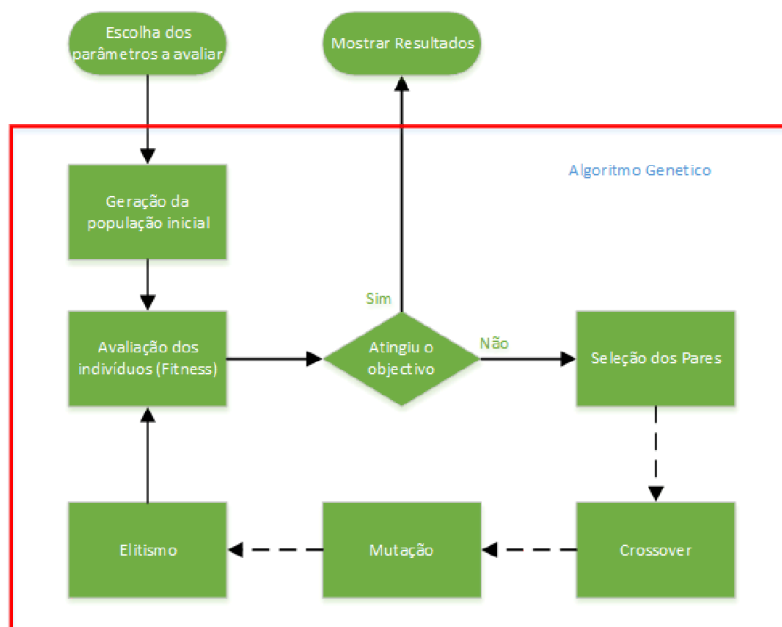


Figura 3.7 – Esquema representando as fases do algoritmo genético. [28]

Existem passos existentes dentro do campo da mutação que estão omissos na Figura 3.7. Em resumo, esses passos são uma nova avaliação dos indivíduos tanto a nível de elegibilidade (se estão dentro dos limites obrigatórios a nível de *tilt* e *azimute*), como a nível de quantidade de dados para a próxima geração.

Os valores das variáveis principais que são normalmente utilizados quando se implementa este tipo de algoritmos são:

- Probabilidade de *Crossover*: Deve ter um valor elevado, normalmente entre os 80% e 95%. No entanto para alguns problemas muito

particulares os resultados mostram que uma probabilidade de 60% é o ideal. [29]

- Probabilidade de mutação: No caso desta variável é importante que não tenha um valor muito elevado, sendo os melhores resultados encontrados quando se utilizam probabilidades entre 0.5% e 1%. [29]
- Tamanho da População inicial: Uma população demasiado grande não traz benefícios a nível do desempenho temporal do algoritmo, sendo um número de indivíduos inicial ideal por volta dos 20 a 30. No entanto, para casos particulares existiram melhores resultados com uma população de 50 a 100 indivíduos. [29]

Para além dos conceitos apresentados ainda há mais uma divergência na estrutura utilizada do algoritmo genético. Devido às propriedades do método de *crossover* utilizado (3.3.6) é necessário fazer uma avaliação dos pares depois do cruzamento dos mesmos para garantir que os limites impostos ao *tilt* e azimute continuem a ser cumpridos. Para além disso, também foi implementada uma adição aleatória de novos elementos para substituir os que foram eliminados por não garantirem os parâmetros requeridos. Na Figura 3.8 está representado o diagrama de blocos de um algoritmo genético original e o diagrama de blocos do algoritmo utilizado neste trabalho.

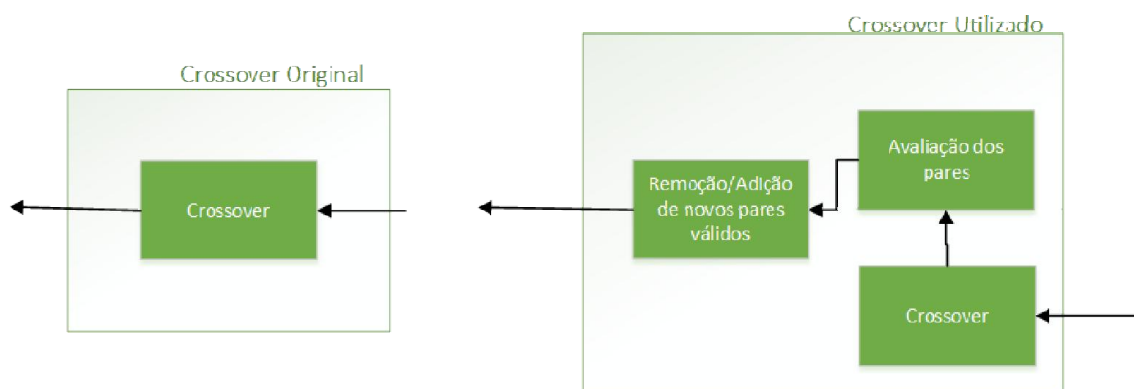


Figura 3.8 – Crossover original do algoritmo genético Vs Crossover utilizado neste trabalho.

3.3.2. Codificação dos Indivíduos

Uma das partes iniciais a definir é a codificação dos indivíduos que vão estar presentes no algoritmo. Este é um processo importante, onde a escolha do tipo de codificação usada tem impacto no desempenho do algoritmo. Não há uma solução

global óptima. Existem duas formas de codificação bastante usadas neste tipo de problemas:

Codificação Binária:

A codificação binária é aquela que é mais usada quando se está a desenvolver algoritmos genéticos, devido à sua analogia directa com a genética natural. A forma de representar os indivíduos é através de apenas 0's e 1's (Equação 3.2).

$$B = [01101\ 11001\ 10101\ \dots B_n] \quad (3.2)$$

,onde B_n representa um indivíduo.

Devido à sua simplicidade de criação e utilização, esta é a codificação mais utilizada no meio dos algoritmos genéticos. No entanto quando se trata de representar números reais é necessário ter em conta a precisão requerida, sendo que esta irá aumentar o tempo de processamento à medida que seja cada vez mais precisa. Para calcular a precisão pode-se recorrer à equação 3.3 [23].

$$Nbits = \log_2(\Delta t \times 10^{precisao}) + 1 \quad (3.3) [24]$$

,onde Δt o tamanho d intervalo real da variável.

Outro dos problemas inerentes é conhecido como *Hamming Cliffs*, originado quando se codifica dois números adjacentes com cadeias de *bins* muito diferentes. Este problema enfatiza-se quando há uma modificação nos *bits* mais significativos dos indivíduos. Esta modificação pode causar um grande deslocamento no espaço de procura. [28]

Uma possível forma de evitar o problema descrito no último parágrafo é utilizar uma codificação de Gray, que usa números binários mas não sofre malefícios provenientes do efeito de *Hamming Cliffs*, pois na codificação de indivíduos adjacentes utiliza representações binárias semelhantes.

Codificação Real:

A codificação real é outra das opções disponíveis para representar os indivíduos, sendo esta mais prática, pois trabalha com variáveis reais. Dependendo do problema a ser otimizado, esta codificação pode reduzir a complexidade

computacional pois não é necessário uma transformação decimal-binário-decimal, no entanto vai tornar os métodos de troca de informação genética mais complexos. Uma possível forma de representação dos indivíduos é demonstrada de seguida na equação 3.4.

$$R = [2,43 \ 4,1 \ 1,927 \dots R_n] \quad (3.4)$$

,onde R_n representa um indivíduo.

Para este estudo, como os parâmetros de entrada do algoritmo são números reais (azimute e *tilt*) foi decidido a utilização de uma codificação real, onde cada indivíduo é constituído por uma série de pares azimute/*tilt* para cada estação.

3.3.3. População Inicial

Como representado no esquema da Figura 3.7, um dos primeiros passos na realização do algoritmo é a criação de uma população inicial. Esta vai depender do número de indivíduos pretendido, dos valores máximos e mínimos das variáveis e da precisão necessária.

Como cada elemento do universo pode ter uma série de valores variáveis, é necessário desenvolver um estudo de forma a formular qual o melhor valor a atribuir à quantidade de elementos que vão fazer parte da população inicial. Este estudo é necessário porque se o número escolhido for muito baixo pode demorar muito a convergir para um valor ideal e ficar preso em máximos locais, mas se por outro lado for um valor muito elevado pode demorar muito a avaliar os elementos em cada iteração e prejudicar gravemente o desempenho temporal do algoritmo.

No entanto, na fase actual de desenvolvimento do algoritmo não é possível realizar este estudo, pois é necessário que a função de avaliação esteja concluída (otimizada para o problema). Desta forma no trabalho foi utilizado um valor padrão aconselhável de 20 elementos. [29]

3.3.4. Avaliação da Adaptação

Na avaliação dos indivíduos tem de se ter em consideração que cada elemento é um candidato a uma possível solução do problema. A função de adaptação tem o

objectivo de quantificar a melhoria conseguida, por cada elemento, em cada iteração do algoritmo. Isso é conseguido através de uma série de funções definidas pelo engenheiro, cada uma com um objectivo de optimização específico. Neste trabalho esse objectivo é a melhoria do nível de sinal RSRP. Normalmente o resultado da função de adaptação é apresentado numericamente. Este é uma das partes mais sensíveis do algoritmo, pois se não for bem definida, não serão obtidos os resultados pretendidos. [28]

Neste estudo foi desenvolvido uma adaptação ao trabalho em [32], que desenvolveu uma série de funções para optimizar de cobertura numa rede LTE.

Estas funções baseiam-se na minimização do número de *bins* na rede que sofrem de:

- *Pilot Pollution*
- Fraca cobertura ou buracos de cobertura

Em [32] era possível a adição e exclusão de estações sempre que conveniente, o que numa rede real não é possível. Neste estudo não é suposto incluir a potência como parâmetro de entrada para o algoritmo [30].

Neste trabalho foram usadas as duas últimas funções $f_1(\theta, \varphi)$ e $f_2(\theta, \varphi)$ respectivamente, mas com uma adaptação na função de *pilot pollution*, tornando possível que se indique a partir de que quantidade de estações se consideram dentro desta categoria.

De uma forma mais pormenorizada, as duas funções que foram incluídas estão explícitas na equação 3.5.

$$\begin{aligned}
 f(\theta, \varphi) &= \min[f_1(\theta, \varphi), f_2(\theta, \varphi)] \\
 f_1(\theta, \varphi) &= \sum_{i=1}^n \varepsilon(-x + \sum_{j=1}^m \varepsilon(RSRP_{i,j} - P_{th})) \\
 f_2(\theta, \varphi) &= \sum_{i=1}^n \varepsilon(1 - \sum_{j=1}^m \varepsilon(RSRP_{i,j} - P_{th}))
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

,onde θ e φ são o *tilt* e azimute respectivamente, o i e j são cada estação emissora e cada *bin* onde cada uma destas serve. ε é uma função de degrau, ou seja,

$\varepsilon(x) \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}$. O $RSRP_{i,j}$ é o nível de sinal num dado *bin* e o P_{th} é o limiar pelo qual

se considera um *bin* com nível de sinal aceitável. Por fim, x é um parâmetro de entrada presente na interface que permite indicar a partir de que número de estações se considera que se está em *pilot pollution*. Para além do parâmetro x , também é possível definir que peso vai ter cada função para a decisão final. Assim, um utilizador pode dar mais importância à cobertura ou à sobreposição de frequências. No entanto, esta é uma funcionalidade que foi implementada para um desenvolvimento futuro na ferramenta, não sendo incluída neste trabalho qualquer estudo focando o assunto.

Para a avaliação final da adaptação é utilizada a função $f(\theta, \varphi)$ que calcula o mínimo de todas as funções e é feita uma comparação com o valor de $f(\theta, \varphi)$ resultante dos parâmetros originais das antenas. Desta forma é possível avaliar se foi produzida uma melhoria com a presente alteração de parâmetros.

3.3.5. Selecção

É o operador genético responsável por seleccionar os indivíduos da população actual que irão criar a nova geração de indivíduos, ou seja, escolhe os Pais que depois de um processo de reprodução vão dar origem a Filhos que compõem a nova geração. Esta escolha é feita para que os indivíduos melhor adaptados tenham uma maior probabilidade de se reproduzir.

Se este processo fosse omitido no algoritmo genético, este passaria a ser um simples algoritmo de procura aleatória, pois iria perder o seu carácter evolutivo, tornando-o ineficiente. [24]

No entanto, a escolha de um individuo para a reprodução não se deve basear apenas naqueles que têm melhor adaptação, pois há hipótese de que estes não estejam localizados perto do máximo global óptimo.

Para concretizar a selecção existem vários métodos possível de ser aplicados, tais como, o Método da Roleta, o Método de Ranking e o Método do Torneio. O método

da Roleta foi o escolhido para implementar no algoritmo. Os restantes métodos encontram-se explicados no Anexo 0.

3.3.5.1. Método da Roleta:

Este é um dos métodos mais usados para se obter a selecção dos indivíduos uma vez que o seu funcionamento está directamente relacionado com a selecção natural do mais apto. Cada indivíduo neste método é representado numa fatia da roleta, sendo que o tamanho de cada fatia esta directamente relacionado com o valor de adaptação do elemento. Desta forma, indivíduos com maior adaptação terão uma probabilidade maior de serem seleccionados.

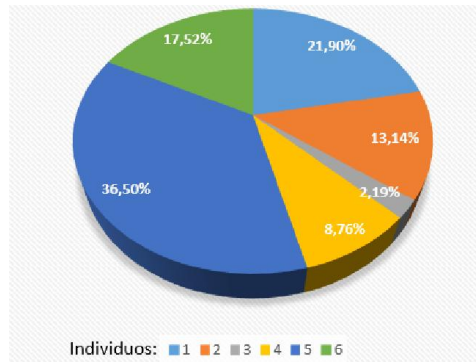
A probabilidade p_i que um individuo i tem de ser escolhido em função da sua adaptação $f(i)$ é expressa pela equação 3.6.

$$p_i = \frac{f(i)}{\sum_i f(i)} \quad (3.6)$$

Este método pode originar uma convergência prematura se existirem indivíduos que possuam uma adaptação muito mais elevada do que a média.

Tabela 3.2 - Método de Selecção da Roleta.

	Tilt	Azimute	adaptação	%Roleta
Individuo 1	2	254	15	21,9
Individuo 2	5	34	9	13,14
Individuo 3	8	12	1,5	2,19
Individuo 4	6	95	6	8,76
Individuo 5	1	340	25	36,5
Individuo 6	8	205	12	17,52



3.3.6. Cruzamento (Crossover)

Depois de serem seleccionados os pares de indivíduos, dá-se a permutação do material genético, dando origem a novos indivíduos. O conjunto de indivíduos criados é chamado de nova geração, sendo cada um deles um filho dos pais permutados. Este poderá, ou não, acontecer de acordo com uma dada probabilidade de *Crossover* ($P_{crossed}$). Esta probabilidade deve ser alta, geralmente definida entre 0,6 e 0,9. [22] No processo de *Crossover* existem vários métodos que podem ser aplicados de forma a fazer o cruzamento de material genético, tais como o *Crossover* binário de um ou dois pontos, o *Crossover* binário uniforme e o *Crossover* de números reais. Como o universo de elementos utilizado no algoritmo são números reais foi escolhido o *Crossover* de números reais para método de cruzamento. Os restantes métodos estão explicados no Anexo 0

3.3.6.1. Blending Crossover para números reais:

O *Blending Crossover* permite um melhor tratamento de números reais do que os anteriores métodos, pois baseia-se em expressões matemáticas para fazer o cruzamento do material genético entre pais. A forma de cruzar o material genético está explicita nas equações 3.7, 3.8 e 3.9.

$$C_1 = \gamma P_1 + (1 - \gamma) P_2 \quad (3.7)$$

$$C_2 = \gamma P_2 + (1 - \gamma) P_1 \quad (3.8)$$

$$\gamma = (1 + 2\alpha) \times R - \alpha \quad (3.9)$$

, onde P_1 e P_2 são os cromossomas dos Pais, C_1 e C_2 os cromossomas dos Filhos, α o coeficiente de exploração ($\alpha \geq 0$) e o R que é um número aleatório entre 0 e 1. Quanto ao coeficiente α serve para o programador mudar a área resultante em que os Filhos poderão surgir, ou seja, se o $\alpha = 0$ os Filhos estarão limitados dentro dos valores dos Pais, se for $\alpha > 0$ os Filhos poderão sair dos limites. Quanto maior for o α maior a área em que poderá aparecer um Filho. Um exemplo ilustrativo pode ser encontrado na Figura 3.9, representando o efeito do α nos resultados.

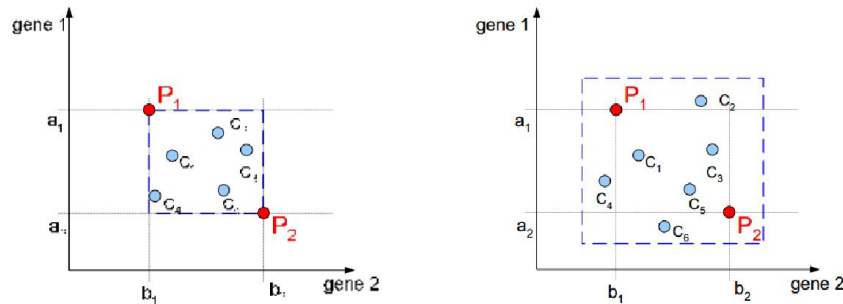


Figura 3.9 – Representação gráfica do Blending Crossover para $\alpha = 0$ e $\alpha > 0$ respectivamente. [31]

Foi implementado o *Blending Crossover* com um $\alpha > 0$ para garantir que todas as soluções possíveis são consideradas nos cálculos.

3.3.7. Mutação

A mutação é uma operação simples, caracterizada pela alteração aleatória de uma parcela do material genético de um indivíduo. De uma forma semelhante ao *Crossover*, a mutação pode ocorrer ou não, de acordo com uma probabilidade. No entanto esta probabilidade, é normalmente, bastante mais baixa que a de *Crossover*, situada entre 0 e 0,1. [28] Uma representação deste processo é demonstrada na Figura 3.10.

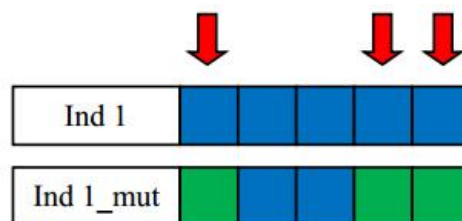


Figura 3.10 – Mutação do indivíduo “ind 1” em 3 das suas 5 parcelas.

3.3.8. Elitismo

Elitismo é um método que pode ser integrado nos algoritmos genéticos. Tem como objectivo, tal como o nome indica, guardar uma certa quantidade de pais de elite para a próxima geração. Assim, é garantido que o bom material genético não é perdido de uma geração para a próxima. Isto é especialmente importante se não existir um critério de paragem definido, ou seja, num algoritmo que procura o resultado mais optimizado possível. Como esse é o caso presente neste estudo, o elitismo foi implementado para guardar o melhor elemento de cada nova geração.

3.3.9. Critérios de Convergência

Existem dois critérios para testar a convergência. Um deles é a definição de um valor de paragem. Ou seja, se o valor considerado óptimo for conhecido, pode-se definir esse valor como máximo admissível. Dessa forma o algoritmo pára quando encontra uma combinação de valores que originem esse valor máximo definido.

Outro dos critérios possível é através da diversidade genética da população. Ao observar que os indivíduos estão com valores muito idênticos entre si, significa que aí se encontra um máximo. O problema inerente a este critério é que esse máximo tanto pode ser local como global.

Ainda existe uma terceira condição de paragem, a paragem obrigatória depois de uma certa quantidade de iterações. Desta forma, evita-se que o algoritmo corra indefinidamente. Esta também pode ser a melhor solução para encontrar um máximo se não tiver a hipótese de aplicar qualquer critério de convergência. No entanto, para funcionar é necessário ter um número razoável de iterações para procurar de forma eficaz o máximo.

Para melhor servir o objectivo deste estudo foi escolhida a última hipótese de convergência. Quanto às duas primeiras hipóteses não serviam o objectivo, pois para além de não se ter conhecimento de qual é o máximo ideal de adaptação para cada situação, também não é benéfico se o algoritmo convergisse para um máximo local e prejudicasse o resultado final dessa forma.

Capítulo 4

Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados de alguns cenários de teste formulados para o algoritmo de *crossed sector* e de otimização cobertura.

No *crossed sector* são apresentados três cenários: um com *crossed sector* real, outro com *crossed sector* forçado e um terceiro com a área de cobertura mal definida, originando problemas.

No caso da otimização de cobertura é apresentado um cenário de teste com duas estações base. É verificado no teste a melhoria tanto a nível de cobertura, como de nível de sinal em zonas já cobertas.

4.1. Algoritmo de Crossed Sector

4.1.1. Cenário de teste – Portugal Continental

Através da cooperação existente com a Celfinet e dos dados com os parâmetros da rede e medidas de *drive test* disponibilizadas pela Vodafone, foi possível desenvolver uma série de testes na zona do Porto, Braga e Aveiro.

No esquema da Figura 4.1 percebe-se que apesar de existir um número elevado de estações presentes no país, apenas 134 dessas contém dados. Assim à partida essas 134 são o universo de onde pode surgir um *crossed sector*, como as restantes estações não têm dados são consideradas como correctas.

Os problemas encontrados nas nove estações em que foi detectado *crossed sector* podem ser resumidos em três pontos principais:

- Erros provenientes da base de dados, onde os PCIs dos vários sectores têm todos o mesmo valor;
- Medidas com má distribuição espacial. Apesar de existirem medidas dos vários sectores, estão concentradas na área de apenas um sector;
- Falta de medidas num sector.

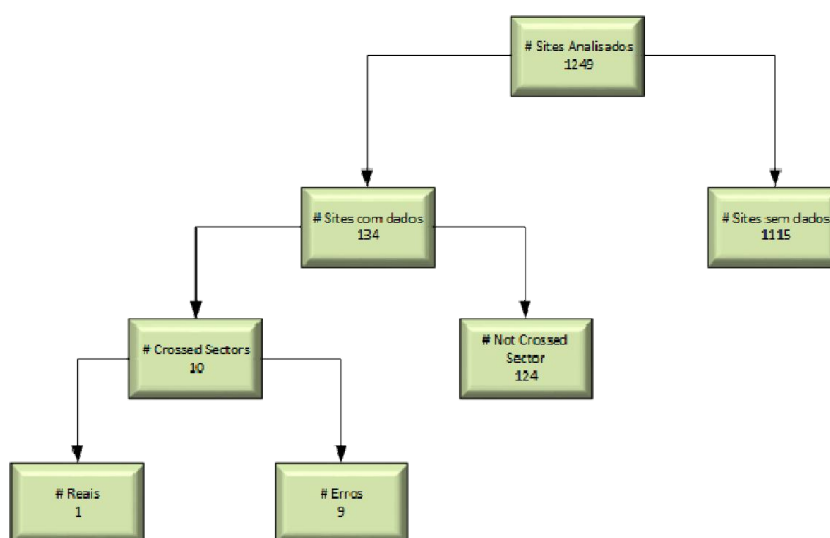


Figura 4.1 – Resumo dos resultados decorrentes da análise a Portugal Continental.

Na Tabela 4.1 estão representados os vários sectores que indicaram *crossed sector* devido a um dos erros indicados em cima, sendo que cada um é incluído numa das categorias.

Tabela 4.1 – Estações reportadas como estando em *crossed sector* no teste a Portugal continental

Estações	Razão do Problema
Site_Inconsistente 1	Erro na Base de Dados
Site_Inconsistente 2	Falta de medidas de um sector
Site_Inconsistente 3	Medidas concentradas num sector
Site_Inconsistente 4	Medidas concentradas num sector
Site_Inconsistente 5	Falta de medidas de um sector
Site_Inconsistente 6	Medidas concentradas num sector
Site_Inconsistente 7	Erro na Base de Dados
Site_Inconsistente 8	Medidas concentradas num sector

Na tabela 4.1 apenas constam 8 dos 10 *crossed sectors* detectados. As entradas que faltam são apresentadas de seguida, pois são casos particulares.

4.1.1.1. Crossed Sector Real – Site CrossedSector 1

Neste cenário é apresentado uma estação tri-sectorizada com dados existentes em todos os sectores. A apresentação dos resultados irá focar-se numa breve análise técnica dos gráficos de detecção e de decisão, bem como uma introdução sobre as características da estação.

A estação é denominada de Site_CrossedSector 1 e é composta por três sectores orientados para as seguintes direcções: 60° (PCI:0), 160° (PCI:2), 320° (PCI:1). Além de existirem medidas em todos os sectores, algumas delas são eliminadas pelas limitações apresentadas no ponto **Error! Reference source not found.**, mas mesmo assim são utilizadas 74% das medidas disponíveis para o par de sectores em que foi detectado o *crossed sector*.

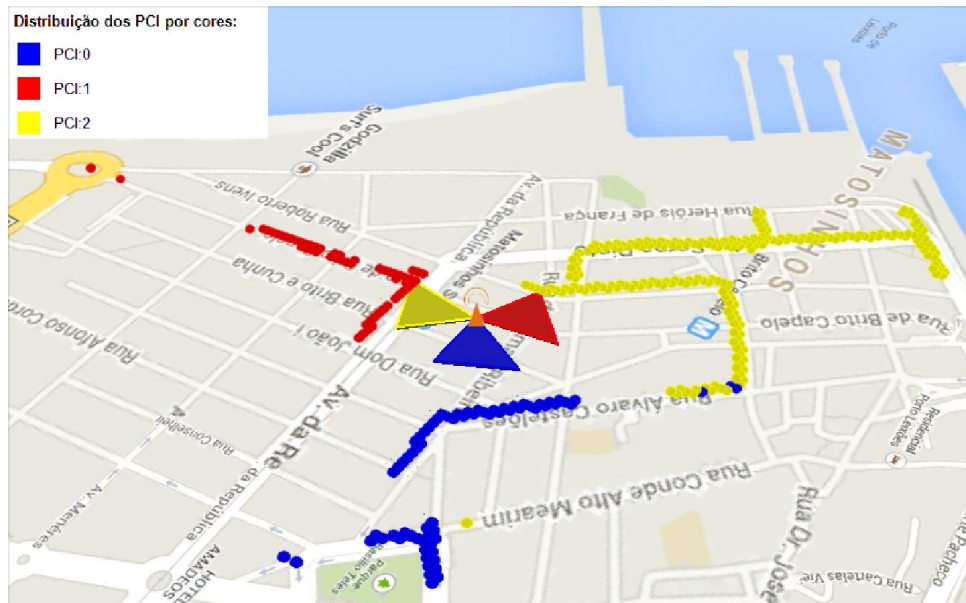


Figura 4.2 – Representação dos sectores e medidas da estação Site_CrossedSector 1.

O *crossed sector* é identificado entre os sectores de PCI 1 e 2, tal como representados a azul e vermelho na Figura 4.2. De seguida vai ser apresentado o estudo realizado sobre a análise feita aos dados, à forma de decisão e ao nível de confiança com que se indica que se trata de um *crossed sector*.

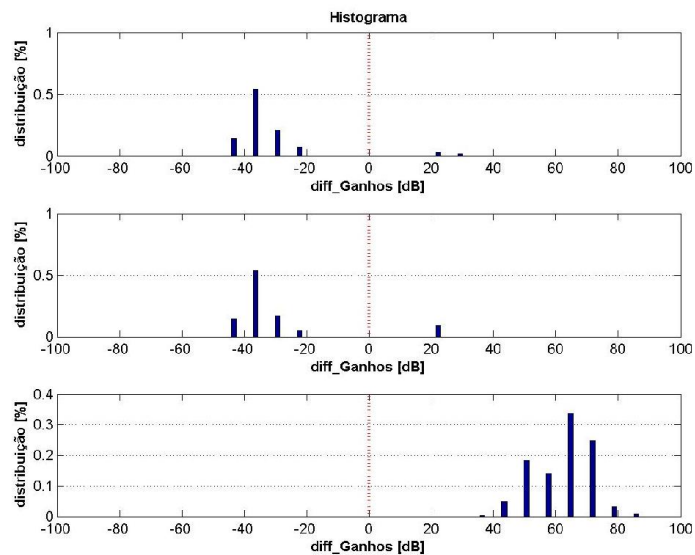


Figura 4.3 – Histograma da estação Site_CrossedSector 1 para os pares de sectores 0-1, 0-2, 1-2 respectivamente.

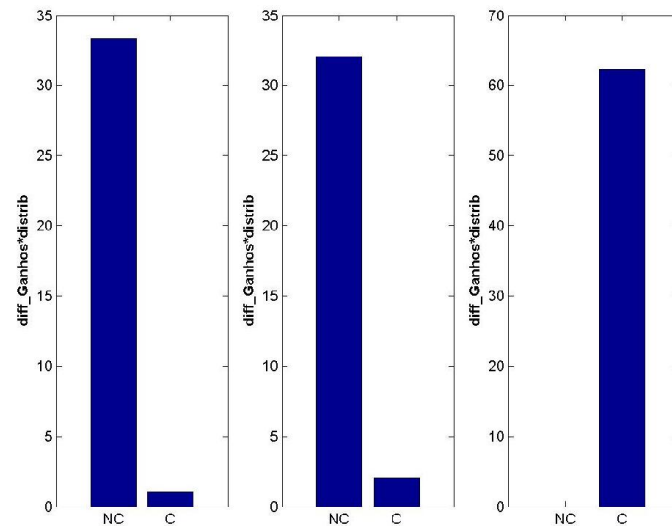


Figura 4.4 – Diagramas de decisão do algoritmo para a estação de Site_CrossedSector 1. Os pares de sectores apresentados são o 0-1, 0-2, 1-2 respectivamente.

Através do histograma é possível avaliar a distribuição dos *bins* entre *crossed sector* e *not crossed sector*. É preciso ter em conta que quanto mais positiva estiver a posição de uma barra, mais certeza se tem que contribui para uma situação de *crossed sector*. O inverso, para valores negativos (*not crossed sector*), também se aplica. Neste caso, e através da observação da Figura 4.3, percebe-se que o único par de sectores que se encontra trocado é o 1-2. A decisão do algoritmo é feita através da comparação entre a área ocupada pelo *crossed sector* com a área ocupada pelo *not crossed sector* (Figura 4.4). Na mesma figura também é possível identificar o valor médio da distribuição estatística presente no histograma. Esse valor para o caso do *crossed sector* é de 60 (Figura 4.4 c)). Conseguem-se perceber por comparação com os gráficos da Figura 4.4 a) e b) que é um valor elevado, indicando que é uma decisão coesa.

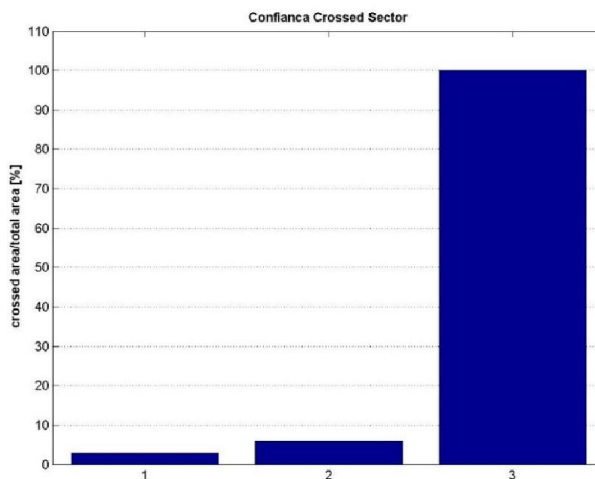


Figura 4.5 – Nível de confiança da decisão para a estação Site_CrossedSector 1. Os pares de sectores apresentados são o 0-1, 0-2, 1-2 respectivamente.

Para terminar, é possível indicar a percentagem de certeza de um par de sectores se encontrar trocado. Como se pode verificar pela Figura 4.5, apenas o par de sectores 1-2 tem uma percentagem elevada de confiança, estando os restantes com percentagens abaixo dos 10%, indicando que certamente não se encontram trocados.

4.1.1.2. Área de cobertura mal definida – Site_CrossedSector 2

Ao contrário dos casos anteriores, onde foi detectado um *crossed sector*, este caso foi detectado mas é uma situação em que não se consegue perceber qual é a área de serviço de cada sector. Por essa mesma razão, a percentagem de certeza no resultado desce abruptamente para valores na casa dos 50% - 60%. A orientação dos sectores é a seguinte: 60° (PCI:147), 160° (PCI:148), 300° (PCI:149). Esta situação causa mais problemas do que os erros anteriores pois não existe forma de a filtrar, já que o problema advém das medidas realizadas.

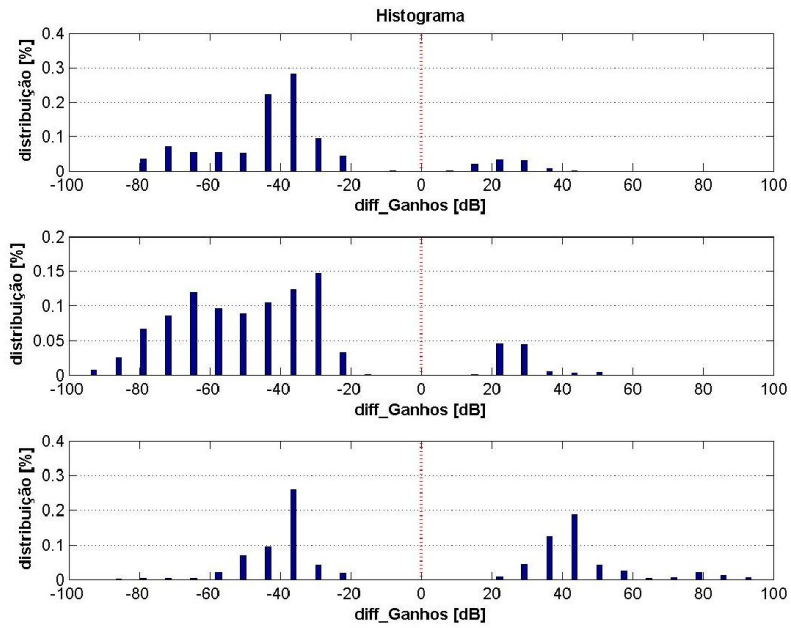


Figura 4.7 – Histograma da estação Site_CrossedSector 2, para os pares de sectores 147-148, 147-149 e 148-149.

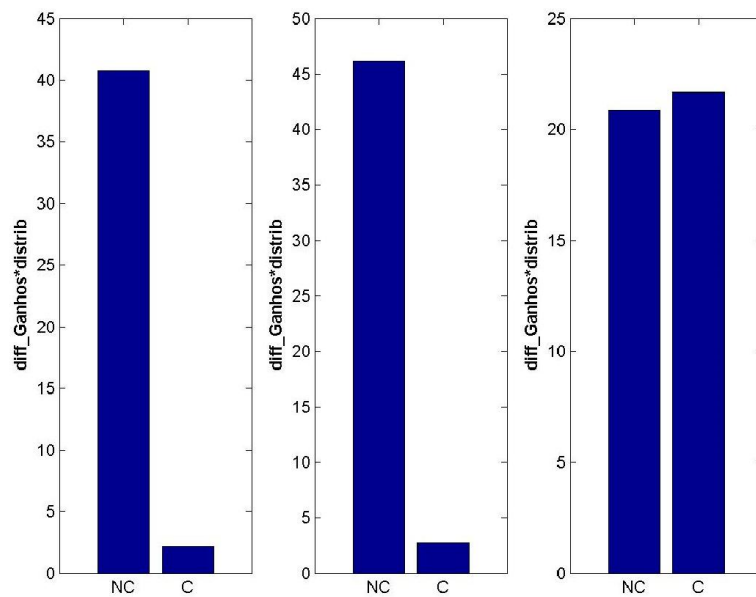


Figura 4.8 - Diagramas de decisão do algoritmo para a estação Site_CrossedSector 2. Os pares de sectores apresentados são o 147-148, 147-149 e 148-149 respectivamente.

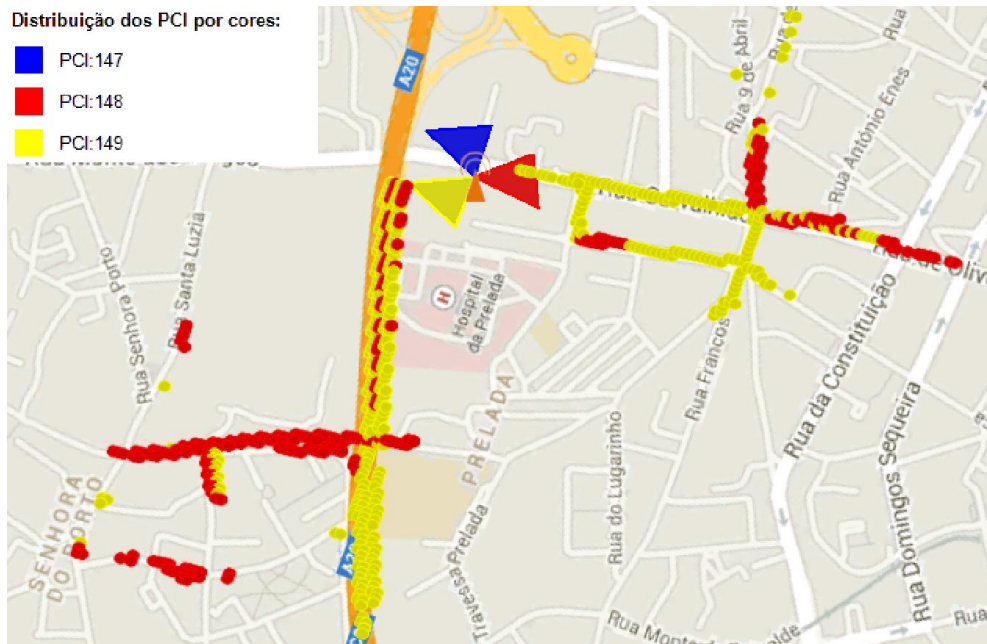


Figura 4.9 – Avaliação do par de sectores 148-149 da estação de Site_CrossedSector 2.

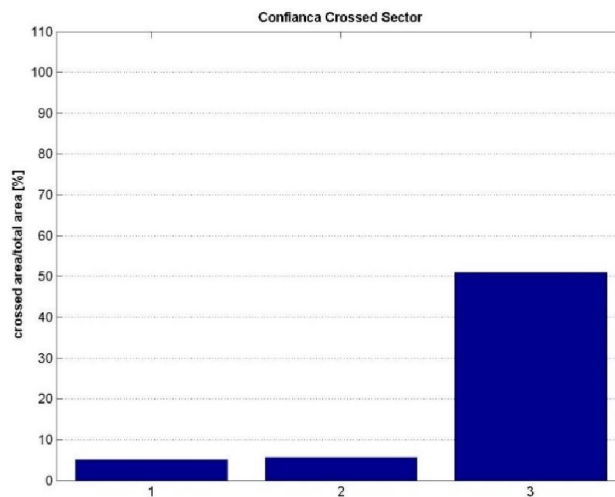


Figura 4.10 - Nível de confiança da decisão para a estação Site_CrossedSector 2. Os pares de sectores apresentados são o 147-148, 147-149 e 148-149 respectivamente.

4.1.2. Cenário de teste – Crossed Sector forçado na estação Site_CrossedSector 3

Neste exemplo é apresentado um cenário de teste em que apenas existe uma estação base com medidas referentes aos três sectores. O teste será dividido em duas partes, numa primeira parte é executado o algoritmo sem fazer qualquer alteração nos sectores. O objectivo é verificar se existe algum falso positivo. Numa segunda fase será

forçada uma troca entre dois sectores, para desta forma poder ser testado o algoritmo e analisados os resultados.

A estação base utilizada para os testes, Site_CrossedSector 3, é tri-sectorizada com os seus sectores direccionados nos azimutes 30° (PCI:1), 130° (PCI:0) e 270° (PCI:2).

Testes iniciais de despiste de falsos positivos:

Como se pode constatar pela Figura 4.11 não existe nenhum par de sectores encontrado em *crossed sector*. Na imagem foi feita uma apresentação global dos sectores e suas medidas, no entanto o algoritmo retorna um ficheiro kml por cada par de sectores. Desta forma, exclui-se a hipótese de existirem falsos positivos para esta estação base. Para além disso, consegue-se perceber que as zonas de serviço de cada sector estão dispostas na direcção para o qual cada um dos sectores está orientado.



Figura 4.11 – Representação da avaliação inicial dos sectores da estação Site_CrossedSector 3 e dos bins que são servidos por cada um dos três sectores.

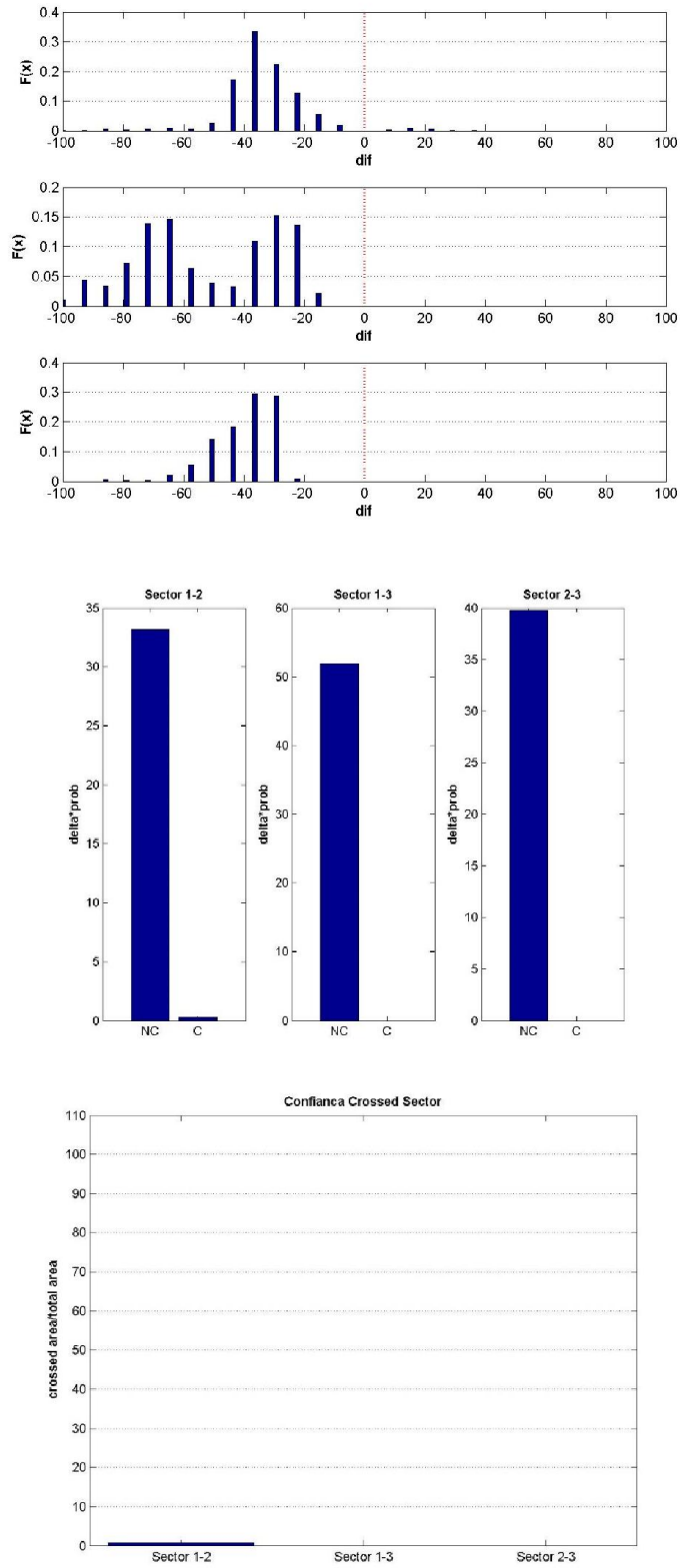


Figura 4.12 – Histograma e relatórios de estatística e de decisão do algoritmo para um caso onde não existe crossed sector. Sectores 0-1, 0-2 e 1-2 respectivamente. Estação de Site_CrossedSecto 3.

Para não restarem dúvidas é importante a consulta dos relatórios de estatística e de decisão, resultantes do teste a cada um dos 3 sectores (Figura 4.12). No histograma da Figura 4.12 identifica-se que quase todos os *bins* de todos os sectores situam-se na área de *not crossed sector*. Apenas no par de sectores 1-0 existem alguns *bins* que não coincidem com o resultado final e se encontram na área de *crossed sector*. Tal como no histograma, tanto o gráfico de decisão como o de confiança mostram resultados bastante coesos para suportar a decisão previamente assinalada.

Troca e teste dos sectores 1 - 0:

De forma a introduzir um caso de *crossed sector* no ambiente em questão, foi trocado, a nível da rede, o sector de PCI = 1 com o sector de PCI = 0. A localização das medidas existentes no cenário foi mantida. Para não restarem dúvidas, a nova configuração das antenas é: 30° (PCI:0), 130° (PCI:1) e 270° (PCI:2).

Depois de executados os testes no algoritmo, foi identificado um *crossed sector* tal como esperado. Na Figura 4.13 consegue-se identificar que as medidas a azul estão maioritariamente na zona de serviço do sector a vermelho e vice-versa.



Figura 4.13 – Representação de um *crossed sector* para a estação de *Site_CrossedSector 3*.

Tal como no histograma anterior, é claro em que situação se encontra o par de sectores 1-0, sendo esta a de *crossed sector*. A diferença para o histograma anterior é que os pares de sectores 1 – 2 e 0 – 2 possuem muito menos medidas para suportarem as

suas decisões, ao contrário do par de sectores 1-0 que possui a mesma quantidade. Este fenómeno surge devido à troca forçada entre os sectores. Considerando que com os sectores trocados as medidas do sector 1 estão na direcção do sector 0 e vice-versa. Quando se estão a identificar as medidas pertencentes aos sectores 0 – 2, na área do sector 0 não se vai obter nenhuma medida, restando apenas as medidas do sector 2. Esta situação está ilustrado na Figura 4.14, e tal como acontece numa situação “fabricada”, também pode acontecer num cenário real onde pode ser a principal razão para se identificarem poucas medidas num dado sector para um teste a um par de sectores. Outra forma de identificar a perda de medidas é observando se existe alguma alteração entre os gráficos da Figura 4.12 b) e da Figura 4.15 b). Como é de esperar essa alteração é identificada nos 2 pares de sectores que não foram trocados, sofrendo uma degradação de 50 para 45 e de 40 para 35.

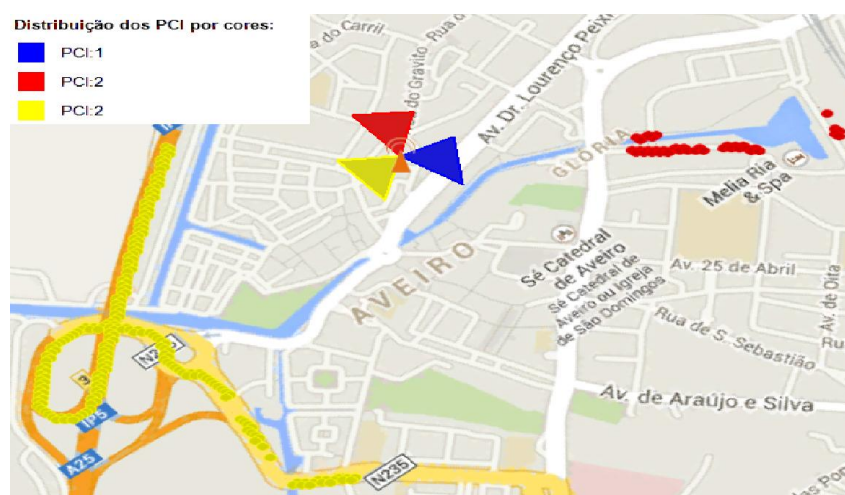


Figura 4.14 – Fenómeno da falta de medidas num cenário de *crossed sector* forçado.

Tal como evidenciado na figura Figura 4.13, percebe-se que existe um *crossed sector* entre os sectores de $PCI = 0$ e $PCI = 1$. Para garantir que nenhuma falha foi cometida na análise da figura anterior, foram representados os gráficos de estatística, decisão e o histograma que permite aferir se os *bins* que estão trocados são os que dispõem de uma maior área relativa. Através da análise do histograma da Figura 4.15 a) é possível observar a distribuição estatística dos *bins*. Com o histograma e o apoio dos gráficos da Figura 4.15 b) é possível concluir que existe um *crossed sector*, com uma média estatística de 33. Comparando com o cenário de teste de 4.1.1.1, em que a média estatística é de 60, o valor é praticamente metade. Isto acontece porque as medidas no

cenário 4.1.1.1 se encontram mais concentradas perto do azimute de máximo ganho do que neste cenário.

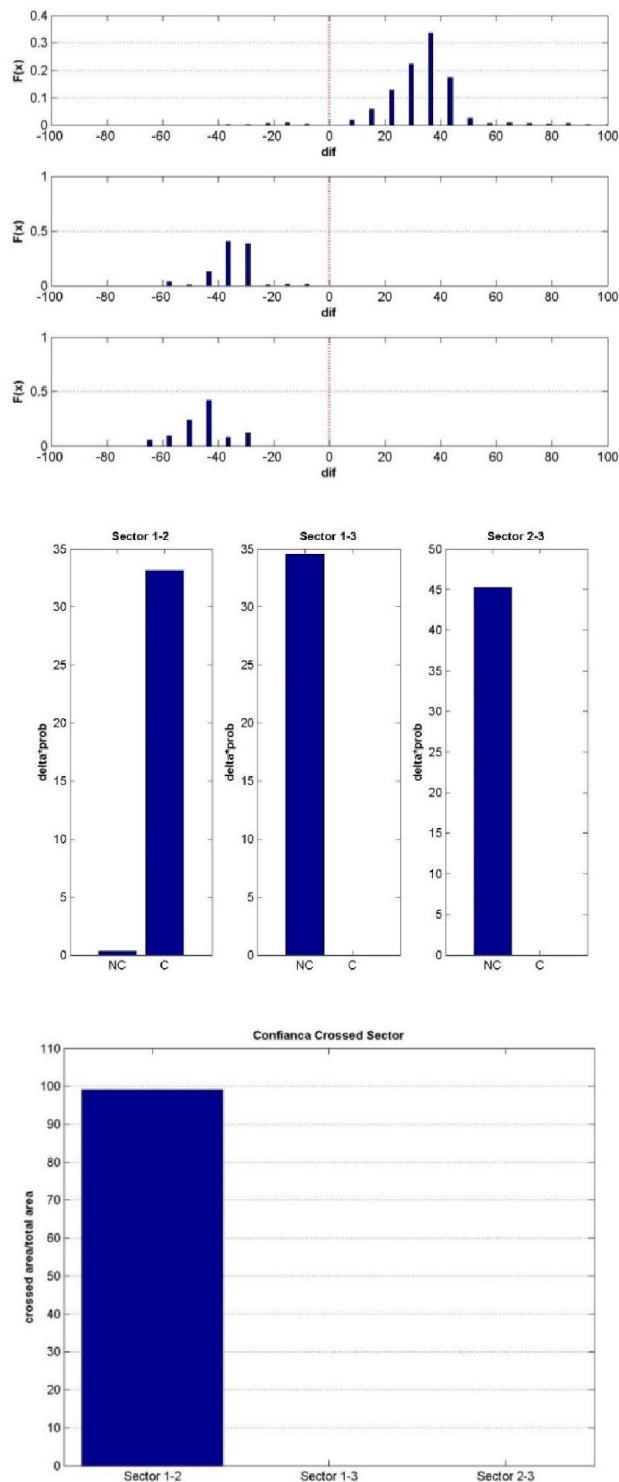


Figura 4.15 - Histograma e relatórios de estatística e de decisão do algoritmo para um caso de crossed sector. Sectores 0-1, 0-2 e 1-2 respectivamente. Estação de Site_CrossedSector 3.

Com a observação conjunta dos gráficos e da representação em Google Earth das medidas e sectores consegue-se concluir com uma grande certeza que realmente há um *crossed sector*.

Para além destes testes o utilizador da ferramenta ainda tem disponível o relatório em Excel. Para este caso em particular, o resultado do relatório final de Excel está apresentado na Figura 4.16 indicando quais os sectores que devem ser trocados entre si.

Cross Sector Analyse Results						
Topology Info					Measurement Info	
Site Name	Site Ref	Site Sector PCI	Half-Power Beamwidth (°)	Antenna Bearing (°)	Perc95 Footprint Distance (m)	Ratio of samples within calculated Footprint (%)
Site_CrossedSector 3	257	0	38	30	0	54,8883928571429
Site_CrossedSector 3	257	1	38	130	0	54,8883928571429

Result	
Cross-Sector Candidate	% of confidence
Site_CrossedSector 3 com PCI=1	99,0284903394826
Site_CrossedSector 3 com PCI=0	99,0284903394826

Figura 4.16 – Relatório em Excel de Crossed Sector forçado entre os sectores 0 e 1 da estação de Site_CrossedSector 3.

4.2. Algoritmo de Optimização de Cobertura

4.2.1. Cenário de teste – Site_Cobertura 1 e Site_Cobertura 2

Aveiro foi a zona escolhida para o cenário de teste do algoritmo de optimização de cobertura. Esta escolha deve-se ao facto de existir uma elevada quantidade de medidas disponível nesta localização, mas também porque se possui duas estações que estão geograficamente próximas e com sectores orientados para uma zona de cobertura comum. As estações escolhidas encontram-se distanciadas de 3520 m e os seus sectores possuem as seguintes características:

Tabela 4.2 - Características das antenas do cenário de teste de optimização de cobertura

Site Name	Sector PCI	Azimute	Downtilt
Site_Cobertura 1	4	30	6
Site_Cobertura 1	3	150	3
Site_Cobertura 1	5	270	6
Site_Cobertura 2	12	10	3
Site_Cobertura 2	14	270	5

Neste caso, os dois sectores que estão orientados para a zona central comum são aqueles com PCI = 3 e PCI = 14.

O que se espera neste teste é observar uma melhoria de cobertura, ou seja, mais *bins* com nível de sinal acima de -120 dBm e um melhor nível de sinal em certas zonas que já tenham cobertura. Para esta última verificação é importante notar que se pretendem fazer melhorias sem degradar muito o nível de sinal na zona próxima da antena.

É importante referir que o algoritmo se encontra em fase de estudo e optimização das funções de adaptação, sendo utilizada para os testes uma função que já foi previamente testada e publicada num artigo como é referido na secção 3.3.4.

4.2.1.1. Parâmetros iniciais utilizados

Tabela 4.3– Parametrização dos valores utilizados no teste ao algoritmo de optimização de cobertura.

<i>População Inicial</i>	20
<i>Probabilidade de cruzamento</i>	85%
<i>Probabilidade de mutação</i>	1%
<i>Número de elitismo</i>	1 un.
<i>Máx variação de tilt</i>	10°

Tal como referido anteriormente (na secção 3.3.1) estes parâmetros têm valores padrão aconselháveis, mas para cada caso podem sofrer alterações. Na tabela 4.3 são identificados os valores utilizados.

É importante referir que neste teste apenas foram permitidas mudanças de *tilt*. Não existem alterações nos azimutes.

4.2.1.2. Análise à Optimização de Cobertura

Um dos pontos essenciais que se observou foi a optimização da área de cobertura conjunta das estações seleccionadas, ou seja, se existe um aumento no número de *bins* em que pelo menos uma medida é superior a -120 dBm.

Tal como identificado na Figura 4.17 existem três zonas principais onde se identifica uma melhoria de cobertura significativa. Todas essas zonas sofreram essa melhoria devido ao *uptilt* no sector de PCI = 3. Esse é o principal sector que serve a zona, pelo que a cobertura aumentou consideravelmente. Através de uma análise numérica na secção 4.2.1.4 é possível identificar, em *bins*, o aumento de área coberta depois de executado o algoritmo de optimização.

No seguimento do parágrafo anterior, é importante identificar qual as alterações que foram indicadas pelo algoritmo para se obter uma optimização no cenário. Os valores iniciais e optimizados estão identificados na Tabela 4.4. Nas imagens de Google Earth, apesar de não serem perceptíveis todos os sectores, quando há um *uptilt* o sector é identificado a verde, um *downtilt* a vermelho e quando mantem o *tilt* inicial a azul.

Nas imagens de Google Earth, apesar de não serem perceptíveis todos os sectores, quando há um *uptilt* o sector é identificado a verde, um *downtilt* a vermelho e quando mantem o *tilt* inicial a azul.

Tabela 4.4 – Valores de *tilt* inicial e optimizado.

<i>Tilt Inicial</i>	6	3	6	3	3	5
<i>Tilt Optimizado</i>	6	2	7	2	3	4

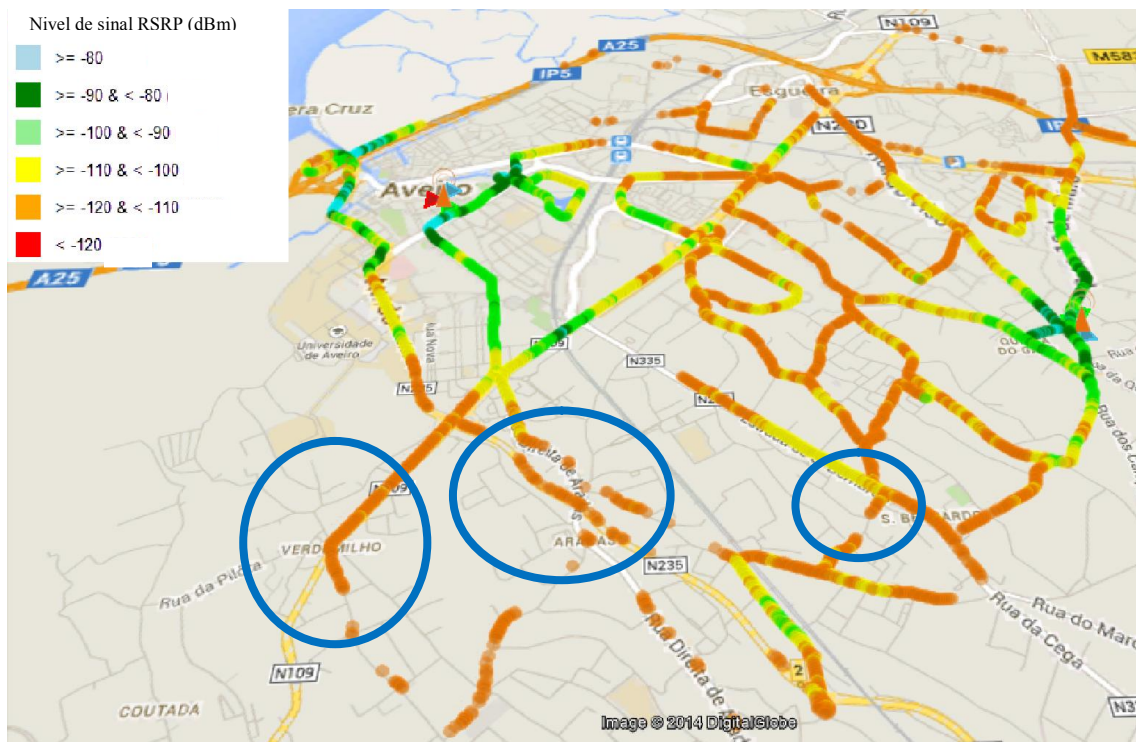


Figura 4.17 – Resultados da optimização de cobertura para as estações de Site_Cobertura 1 e Aveiro Site_Cobertura 2.

4.2.1.3. *Análise à Optimização do nível de sinal RSRP*

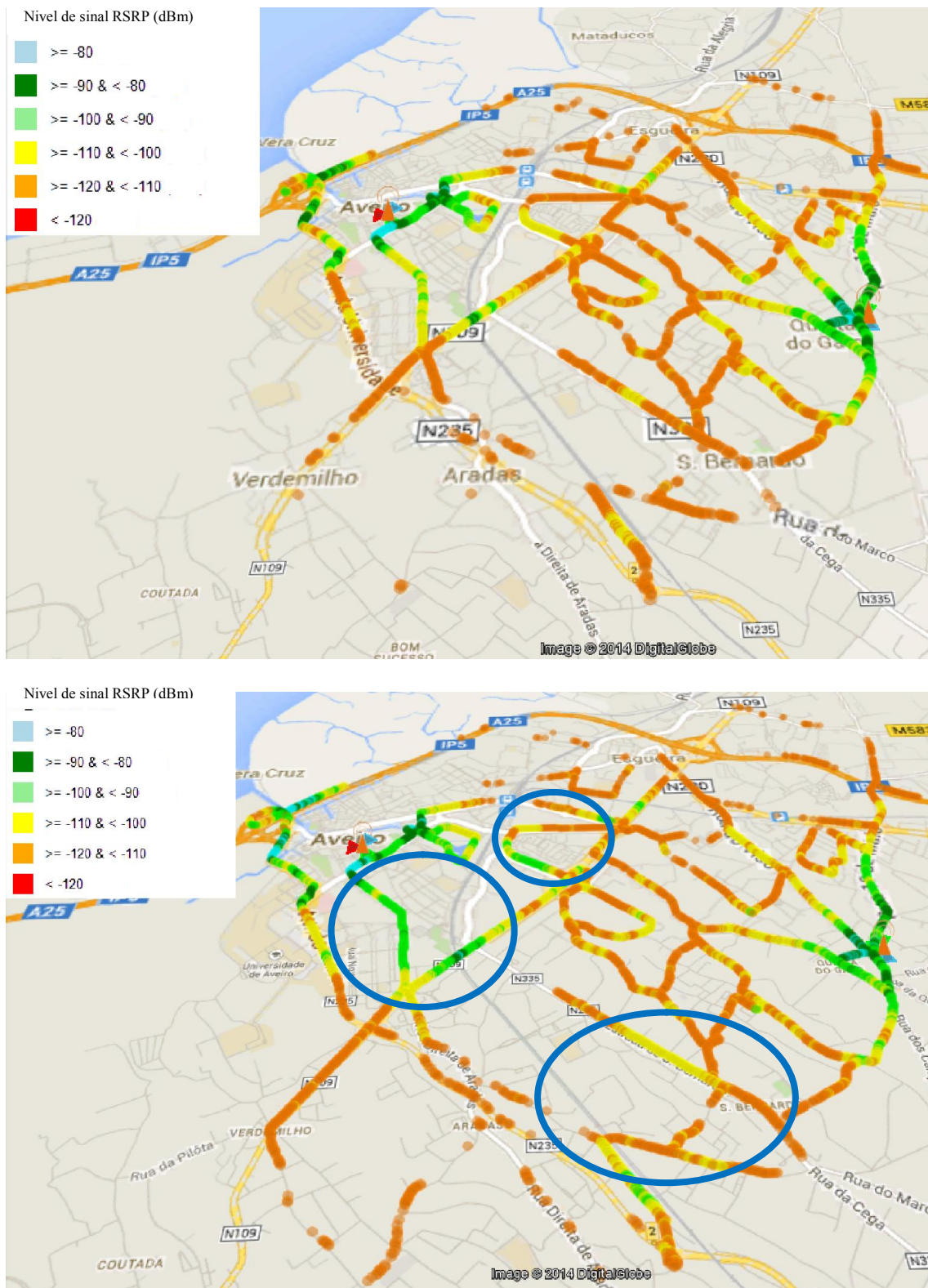


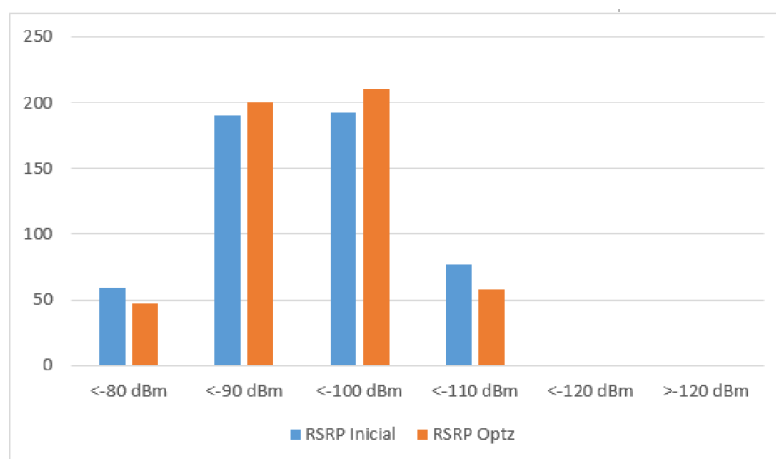
Figura 4.18 – Representação da melhoria de sinal RSRP através da optimização de cobertura.

Na Figura 4.18 consegue-se identificar duas zonas (a azul) onde existiu melhorias razoáveis e outra (a vermelho) onde se identificaram grandes melhorias no nível de sinal optimizado. A razão deste fenómeno é a mesma que foi esclarecida no ponto 4.2.1.3. Existe um *uptilt* de várias estações que suportam esta melhoria, tanto do PCI = 3 da estação de Site_Cobertura 1 como do PCI = 14 da estação de Site_Cobertura 2. Com a melhoria obtida, o MS vai ficar ligado a uma mesma célula mais tempo (nas áreas onde houve melhorias) reduzindo o número de *handovers* naquela área.

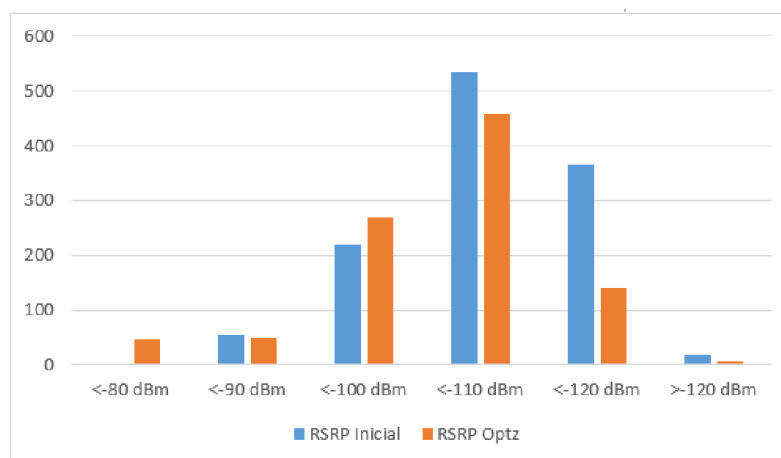
4.2.1.4. Análise conjunta por distância

Os gráficos seguintes representam o nível de sinal para vários intervalos de distância a partir de cada estação. Os dados representados são de um cenário antes e depois de optimizado.

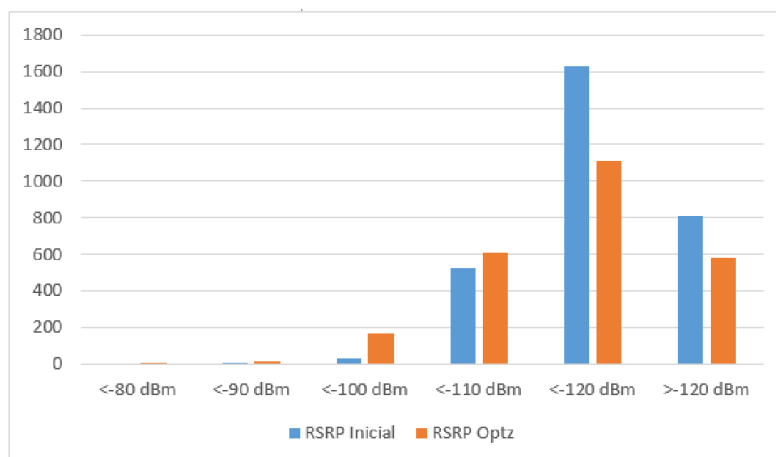
	< 500m	
<-80 dBm	59	47
<-90 dBm	191	201
<-100 dBm	193	210
<-110 dBm	77	58
<-120 dBm	0	0
>-120 dBm	0	0



	<1000m	
<-80 dBm	0	47
<-90 dBm	54	51
<-100 dBm	219	270
<-110 dBm	535	458
<-120 dBm	365	141
>-120 dBm	18	7



	<2000m	
<-80 dBm	0	2
<-90 dBm	7	14
<-100 dBm	28	166
<-110 dBm	522	609
<-120 dBm	1631	1114
>-120 dBm	815	583



	>2000m	
<-80 dBm	0	0
<-90 dBm	0	0
<-100 dBm	0	18
<-110 dBm	67	313
<-120 dBm	524	1346
>-120 dBm	7302	6952

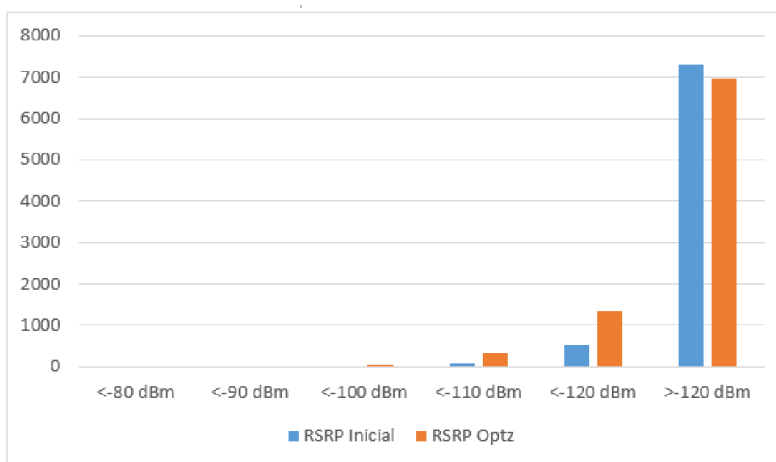


Figura 4.19 – Alterações no nível de sinal para distâncias até 500 m, 1000 m, 2000 m e superiores a 2000 m de uma estação.

Através da análise das Figura 4.19 a) e d) consegue-se observar o conjunto de melhorias conseguidas com o algoritmo.

Através da primeira imagem da Figura 4.19 percebe-se que além de existir uma degradação de sinal, o sinal resultante é suficiente para se continuar a utilizar um UE sem qualquer problema de ligação. Com uma análise mais detalhada percebe-se que no cenário otimizado, apesar de ter havido uma diminuição do número de *bins* servidos com uma potência de sinal de -80 dBm, existe um aumento de *bins* servidos a -90 dBm e -100 dBm. Este aumento é superior à diferença entre o valor inicial e otimizado de *bins* a -80 dBm.

O segundo objectivo é melhorar o nível de sinal e a área de cobertura das duas estações em estudo. Para se conseguir entender a melhoria a nível da amplitude do sinal RSRP, pode-se observar as duas primeiras imagens da Figura 4.19. Na segunda

imagem, onde a distância até à estação encontra-se entre os 500 m e os 1000 m, antes de otimizar, não existiam *bins* com nível de sinal a -80 dBm. Depois de otimizado surgiu uma quantidade considerável de 47 *bins* com esse nível de sinal.

Na terceira e quarta imagens da Figura 4.19, percebe-se claramente que depois de otimizado, para distâncias elevadas, há um aumento do número de *bins* que possuem um sinal superior a -120 dBm. De uma forma geral o número de *bins* cobertos passa de 4472 para 5065, ou seja, 593 *bins*.

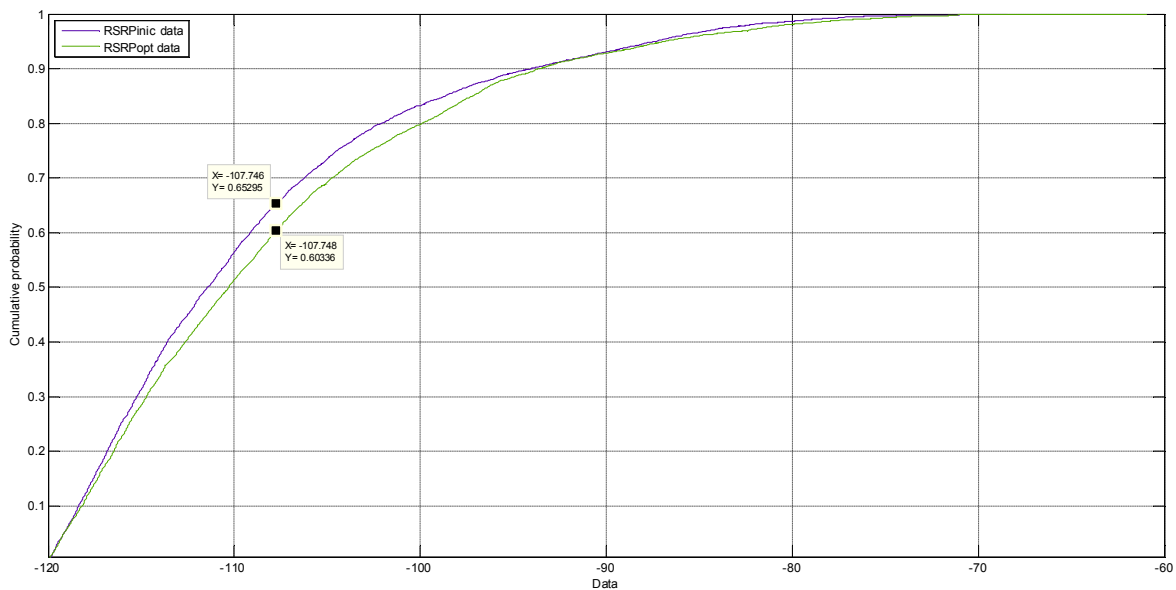


Figura 4.20 – CDF de melhoria conseguida pelo algoritmo de otimização de cobertura.

Outro dos pontos que é relevante referir é a percentagem de melhoria conseguida pelo algoritmo. Esta está representada na CDF da Figura 4.20, onde se verifica uma melhoria aproximada de 5%. Apesar da percentagem de melhoria ser baixa e de haver zonas de optimização quase nulas o desempenho do algoritmo foi de acordo com o esperado, demonstrando um cenário com melhor nível de RSRP resultando numa maior área coberta.

Capítulo 5

Conclusões e Proposta de Trabalho Futuro

Este capítulo é dedicado ao resumo das conclusões obtidas a partir do desenvolvimento de um algoritmo de detecção de *crossed sector* como do algoritmo de optimização de cobertura. Numa segunda parte deste capítulo, são apresentadas propostas de trabalho futuro.

5.1. Conclusões

Na primeira parte da dissertação, focada num algoritmo de detecção de *crossed sector*, realizou-se uma série de testes, nomeadamente com a rede nacional da Vodafone. Os resultados conseguidos demonstraram que ainda existem uma série de cenários em que pode existir problemas de detecção de falsos positivos. No algoritmo de detecção do *crossed sector* utilizou-se uma série de métodos inovadores para o cálculo de diferença de ganhos, selecção de dados e método de estatística que permite obter uma decisão final com uma elevada percentagem de certeza. Dentro dos cenários encontrados com erros estão contemplados os que têm medidas apenas de um sector, os que têm todas as medidas concentradas num sector, os possíveis erros da base de dados referentes a parâmetros e os casos em que não existe uma área de serviço bem definida entre os sectores. No entanto, apesar desses pormenores conhecidos, foi possível a detecção de um *crossed sector* real na zona de Matosinhos com uma certeza de 100%. Foi desenvolvido um segundo cenário com um *crossed sector* forçado onde se identificaram os sectores cruzados. Nesse cenário constatou-se que a quantidade de medidas usadas nos cálculos antes e depois da troca dos sectores é diferente. Esta situação deve-se à posição relativa das medidas em relação aos sectores trocados e às limitações aplicadas no algoritmo. Foram também executados vários cenários de teste, com trocas forçadas de sectores, que tiveram resultados idênticos àquele exposto na dissertação, conseguindo em todos detectar o *crossed sector* que se simulava.

Na segunda parte foi implementado um algoritmo genético com o objectivo de otimizar a cobertura na zona de Aveiro. Foi usada a mesma fonte de medidas e de topologia de rede do algoritmo anterior. As funções de avaliação utilizadas para quantificar a optimização focam-se na fraca cobertura e na sobreposição de pontos com RSRP superior a um determinado valor. Concluiu-se que é possível melhorar consideravelmente o nível de sinal RSRP na zona estudada, aumentando a cobertura conjunta das estações. Através de uma avaliação final, verificou-se que era possível garantir uma melhoria de até 5% em relação ao cenário original. Apesar da melhoria não ser muito elevada, o algoritmo esteve de acordo com o esperado garantindo uma optimização de cobertura do cenário estudado.

5.2. Propostas de Trabalho Futuro

5.2.1. Algoritmo de Crossed Sector

Quando se procedeu à análise de Portugal continental percebeu-se imediatamente qual é o próximo passo a ser feito neste âmbito. É necessário encontrar mecanismos para eliminar os casos que se seguem:

- As medidas estão todas reunidas dentro da área de um só sector.
- Só existem medidas de um sector.

Será necessário um estudo para perceber quais são as melhores opções de resolução.

5.2.2. Algoritmo de Optimização de Cobertura

Existem uma série de passos futuros a realizar. Para começar, é necessário fazer um estudo adicional sobre as funções que avaliam os cenários, tal como o que se quer contemplar nessas funções.

Posteriormente deverá ser incluído no algoritmo uma funcionalidade de optimização de capacidade. Quando essa parte estiver concluída haverá a possibilidade de optimizar tendo em conta a cobertura, a capacidade ou a reunião das duas. Para este passo é necessário um estudo adicional das funções de *fitness* ideais para adaptar o cenário a cada uma das opções que se poderá escolher.

Anexo A - Introdução às Antenas

A crescente expectativa por velocidade, largura de banda e qualidade de acesso requerida pelo consumidor tem levado a uma evolução contínua nas tecnologias de sem fios, incluindo as antenas.

Em LTE é possível garantir uma entrega de dados, com ritmos elevados para uma vasta gama de equipamentos, tal como *smartphones* ou *tablets*. Assim, para além do MIMO também é necessário uma escolha de parâmetros e de tipos de antenas de forma a garantir os exigentes requisitos de qualidade.

Parâmetros Fundamentais

De seguida são apresentados os parâmetros fundamentais das antenas:

Far-field: É a zona que se encontra mais afastada da antena e aquela que interessa para este trabalho em particular. O critério para a definir é normalmente $2 \times D^2 / \lambda$, onde D é a transmissão linear máxima da antena e o λ a frequência de operação [23].

Directividade: É a razão da intensidade de radiação U numa dada direcção com a intensidade média radiada em todas as direcções. O diagrama de radiação representa a directividade. Esta pode ser expressa pela seguinte equação:

$$D = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (5.1)$$

,onde P_{rad} é a potência radiada [23].

Eficiência: A potência na antena pode ser dissipada devida a perdas nos condutores e dieléctricos. Desta forma, a eficiência η pode ser definida como a razão entre a potência total radiada sobre a potência de entrada (P_{in}) [23].

$$\eta = \frac{P_{rad}}{P_{in}} \quad (5.2)$$

Ganho: O ganho da antena é o parâmetro que combina a directividade com a eficiência. De uma forma simplificada, este descreve quanta potência será enviada numa dada direcção tendo em conta a sua potência de entrada. Uma das formas mais comuns de visualizar o ganho de uma antena é através de um gráfico denominado de diagrama de radiação. Este também pode ser expresso pela seguinte equação:

$$G(\theta, \varphi) = \eta \times D(\theta, \varphi) \quad (5.3)$$

,sendo θ a elevação e φ o azimute [23].

Abertura de Feixe a meia Potência (3dB): O *Half-Power Beamwidth* (HPBW) é definido no diagrama pelos pontos horizontais e verticais, onde a potência radiada decai 3dB em comparação com a direcção de intensidade máxima [23];

Largura de Banda: É definido como a gama de frequências no qual a antena trabalha, tal como que é especificada no seu manual [23];

Polarização: A polarização e orientação de uma antena é determinada pelo seu campo eléctrico (plano “E”). De uma forma geral a maior parte das antenas radia com uma polarização linear ou circular. No caso de ser linear esta radia unicamente num plano, contendo apenas uma direcção de propagação, podendo ser horizontal ou vertical. É vertical quando o campo eléctrico é perpendicular à superfície da Terra e horizontal quando este é paralelo. Por outro lado se a polarização for circular a energia radiada será tanto no plano vertical como no horizontal [23];

Azimute da Antena: É definido como sendo uma direcção, em graus (tendo em conta o Norte Real), no qual a antena está direccionada. A distância angular é medida na direcção dos ponteiros do relógio [23];

Tilt da Antena: O *tilt* representa o ângulo feito entre a direcção do feixe principal e o plano horizontal. Podem ser aplicados ângulos positivos e negativos à antena, sendo estes conhecidos como *uptilt* e *downtilt* respectivamente. O *tilt* por sua vez pode ser ajustado de uma forma eléctrica ou mecânica. Uma abordagem mais aprofundada é feita no ponto (0) [23];

Diagrama de radiação

Para se compreender as variações a nível vertical (*tilt*) e horizontal (azimute) é necessário saber como é representada a radiação de uma antena na forma de diagrama. Este diagrama é representação gráfica do nível de sinal existente em todas as direcções da antena. Estes diagramas podem ser observados em 3D ou em 2D, neste último caso é representado a distribuição do sinal a nível horizontal e vertical.

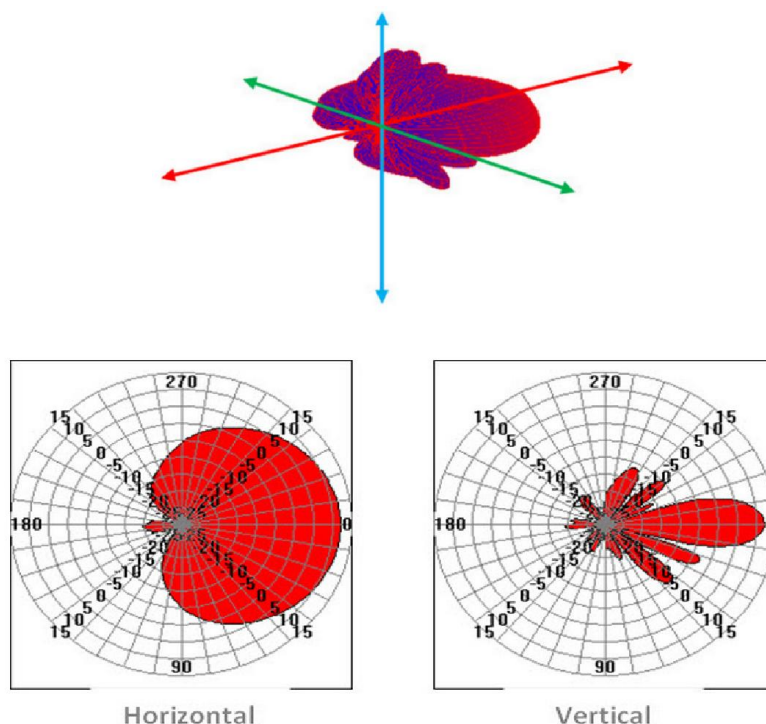


Figura 5.1 – Representação do diagrama de radiação a 3D e a 2D (Horizontal e Vertical) [32].

As linhas rectas indicam a direcção, ou seja, o azimute. Quanto às linhas curvas indicam o ganho em dB. O ganho tanto pode estar normalizado e começar em 0dB a contar do exterior para o interior, como estar heterogeneizado indicando o valor real de ganho como se pode observar na Figura 5.1. [32]

O que é o *tilt* e quais os efeitos na radiação da antena

É chamado de *tilt* quando uma antena faz um ajuste no plano vertical. A forma mais simples mas mais perigosa de o fazer é de forma mecânica, ajustando todo o sector da antena através de suportes ajustáveis. Esta técnica tem um lado negativo, pois não altera a área coberta de uma forma consistente em todo o sector. Este reduz a cobertura mais no ângulo que representa o máximo de ganho e menos nos outros ângulos. O resultado disto é um decréscimo inconsistente muitas vezes apelidado de *pattern blooming*. Outro efeito que muitas vezes é indesejado neste tipo de *tilt* é o *uptilt* nas

costas da antena quando esta foi designada para fazer *downtilt* na frente, podendo causar *overshooting*. Este é um fenómeno omnipresente neste tipo de *tilt* [33].

O outro tipo de *tilt* possível e preferível é o eléctrico, onde para o executar é usada uma técnica que faz *shifts* na fase, de forma a manipular a fase eléctrica. O resultado é a antena permanecer na mesma posição mas alterar a zona que está a servir. Neste caso ao contrário do que acontece no *tilt* mecânico o diagrama altera-se de uma forma consistente nos 360°, encurtando a área de cobertura. O *Pattern blooming* não está presente nesta forma de *tilt*. Outra vantagem existente no *tilt* eléctrico é que pode ser controlado de forma remota, poupando tempo e dinheiro aos gestores dos equipamentos [33].

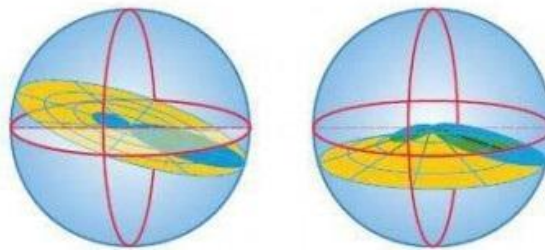


Figura 5.2 – Representação do tilt mecânico e eléctrico respectivamente [33].

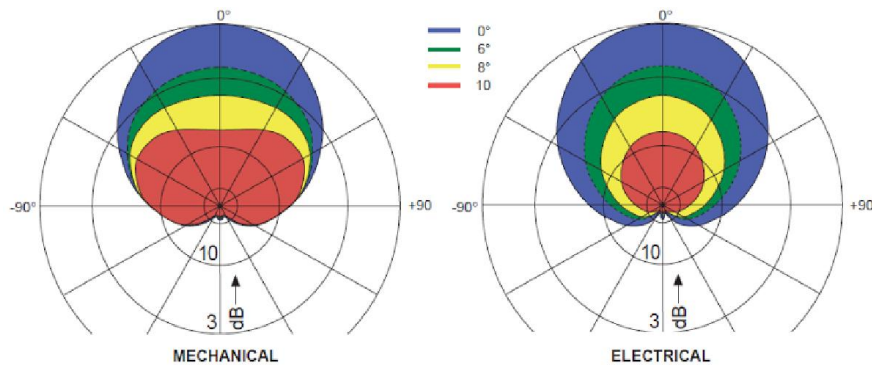


Figura 5.3 – Exemplo do fenómeno de *pattern blooming* [33].

Anexo B - Arquitecturas SON

As SON estão divididas em quatro arquitecturas, tendo em consideração a localização onde estão a correr os algoritmos de optimização. As quatro arquitecturas existentes são a centralizada, localizada, distribuída e a híbrida. Tal como se pode ver na Figura 5.4, cada arquitectura tem os seus domínios de optimização, levando a uma relação com os tempos necessários de operação e o número de células envolvidas.



Figura 5.4 – Arquitecturas SON: Centralizada, Distribuída e Localizada.

Arquitectura Centralizada: Este é um mecanismo onde um grande número de células pode ser optimizado em simultâneo, tendo um ritmo de actualização mais demorado e baseando-se em estatísticas longas (temporalmente). Nesta solução, as funcionalidades SON residem num pequeno número de locais, que se situa numa posição elevada da rede, ou seja, no *Element Management System* (EMS). Quanto aos casos em que esta arquitectura pode ser aplicada, são aqueles em que é necessário o tratamento de muitas células em simultâneo, tal como se a potência ou *tilt* da estação

base fossem otimizados, seria necessário ter em conta as células vizinhas devido a possíveis interferências. Na Arquitectura centralizada os algoritmos são executados no sistema OAM. Como todas as funções SON se encontram ali localizadas é mais fácil se partir daí a optimização. Por outro lado, a contrapartida é que existe uma grande diversidade de sistemas OAM, pois cada vendedor cria o seu, não havendo suporte entre eles [23].

Arquitectura Distribuída: É uma arquitectura que deve ser usada em poucas células em simultâneo, isto para que os parâmetros que forem alterados tenham apenas um impacto local. A informação necessária trocada entre as células envolvidas é enviada através das interfaces X2. Como esta é uma interface para trocar mensagens entre eNBs vizinhos não poderá haver trocas entre células muito afastadas. Um dos problemas associados é o de criar algum tráfego extra nas interfaces, sendo necessário verificar a sua estabilidade e convergência. Na arquitectura distribuída as funcionalidades residem em várias localizações em níveis baixos da arquitectura, sendo os algoritmos executados a nível do eNB. Assim é preferível que os esquemas de optimização não sejam complexos pois é necessária coordenação entre os eNBs, no entanto esta é uma forma de optimização com uma resposta rápida [23].

Arquitectura Localizada: Tal como o nome indica é uma arquitectura aplicada a processos onde apenas uma célula estará envolvida. Esta é utilizada quando são necessários tempos de resposta muito rápidos e onde não há preocupação com o impacto das mudanças efectuadas nas células vizinhas [23].

Arquitectura Híbrida: Esta arquitectura tal como o nome sugere é uma reunião de factores das arquitecturas apresentadas anteriormente. O intuito é produzir um resultado mais indicado para a optimização do que qualquer uma das arquitecturas anteriores conseguia em separado.

Anexo D - Algoritmo Genético – método de selecção

Método de Ranking:

Este método de selecção evita uma convergência prematura e a dominância de um individuo que tenha um valor de adaptação muito elevado em relação aos restantes. Nesta selecção os individuos são colocados numa tabela de ranking de acordo com os valores de adaptação de cada um. Neste método existem algumas vantagens mas também algumas desvantagens que devem ser consideradas. Quanto as vantagens, este método consegue uma redução da pressão selectiva sobre a população nas fases iniciais do algoritmo, onde os valores de adaptação podem diferir muito entre individuos. Uma velocidade de convergência mais elevada no final do algoritmo onde os valores de adaptação são muito próximos entre si. No caso das desvantagens, tem um tempo mais elevado no processamento do algoritmo pois necessita de uma tabela de adaptação ordenada e o tempo de convergência durante a maior parte do algoritmo é mais demorada pois os valores de ranking estão muito próximos entre si, dificultando o processo de convergência. [28]

Método do Torneio:

O método de selecção por torneio consiste numa competição pelo direito de participar nos operadores genéticos que vão criar a próxima geração, utilizando como critério de força a adaptação de cada um. Neste método é definido o número de individuos que irão competir K , entrando estes para os quadros do torneio de forma aleatória. Quanto maior for o valor de K maior será a pressão de selecção, ou seja, os individuos com maior adaptação terão maiores hipóteses. Na Figura 5.5 está representado um exemplo deste método em funcionamento em que foi definido o $K = 3$ e o tamanho da população em 8 elementos.

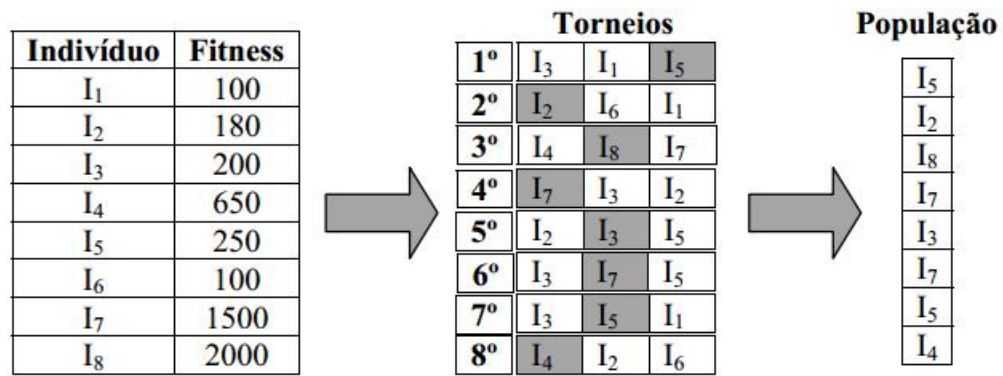


Figura 5.5 – Representação do método de selecção por torneio.

Anexo E - Algoritmo Genético – método de cruzamento

Crossover binário de um ou dois

pontos:

Após escolher os dois indivíduos que irão fornecer o material genético, um ou dois pontos de corte são escolhidos aleatoriamente.

No caso de um ponto de corte, depois de escolhida a posição do corte de forma aleatoriamente, o material genético é cortado nesse ponto em duas partes. Um indivíduo com n genes possui $n-1$ pontos de corte possíveis. A formação dos filhos dá-se com a concatenação da parte esquerda do primeiro Pai com a parte direita do segundo Pai, e vice-versa para o segundo Filho. Um exemplo ilustrativo deste processo pode ser consultado na Figura 5.6.

Se o número de cortes for dois, serão escolhidos dois pontos aleatórios para sofrer o corte. O resto do processo será idêntico aquele quando apenas é feito um corte, sendo que a junção de material genético que da origem ao primeiro filho, é a parte central do primeiro Pai com as partes laterais do segundo pai. É feito um processo idêntico para obter o segundo filho. Pode ser encontrado um exemplo ilustrativo na Figura 5.6.

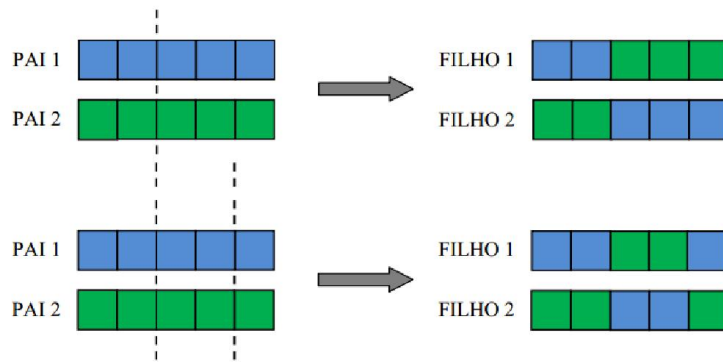


Figura 5.6 – Crossover de um e dois pontos de corte. [28]

Crossover binário uniforme:

O *Crossover* uniforme vai de encontro ao apresentado no ponto anterior (*Crossover* binário de um ou dois pontos) no que toca à troca de material entre dois pais, no entanto a forma de selecção dos bits a ser trocados é bastante diferente. Neste método é gerada aleatoriamente uma cadeia de bit's 0 e 1 que vai guiar a troca de material genético. Assim quando no cruzamento se encontra um bit a 1, é copiado o bit do 1º pai para o 1º filho e do 2º pai para o 2º filho. Quando se encontra um 0 copia-se do 1º pai para o 2º filho e do 2º pai para o 1º filho. O processo está ilustrado na Figura 5.7

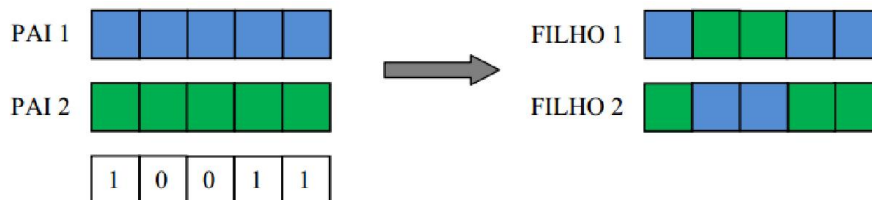


Figura 5.7 – *Crossover* uniforme. [28]

Referências

- [1] tutorialspoint, “tutorialspoint - Simply easy learning,” 2012. [Online]. Available: <http://www.tutorialspoint.com/lte/index.htm>. [Acedido em 2013].
- [2] Rohde & Schwarz, “UMTS Terrestrial Radio Access Network (LTE)-Technology Introduction,” München, 2012.
- [3] Ericsson, “LTE/SAE System Overview,” 2009.
- [4] Artiza Networks, Inc., “<http://www.artizanetworks.com>,” 2012. [Online]. Available: http://www.artizanetworks.com/lte_tut_eut_arc.html. [Acedido em 10 2013].
- [5] D. S. SHAH, “A tutorial on LTE Evolved UTRAN (EUTRAN) and LTE Self Organizing Networks (SON),” Texas, 2010.
- [6] Z. -. A. T. Blog, “<http://zoyok.com>,” 8 Setembro 2012. [Online]. Available: <http://zoyok.com/blog/inside-lte-evolved-packet-core-epc>. [Acedido em 10 2013].
- [7] Telesystem Inovations Inc., “LTE in a Nutshell: The Physical Layer,” Canada, 2010.
- [8] I. Poole, “Radio-Electronics - LTE FDD, TDD, TD-LTE Duplex Schemes,” Adrio Communications Ltd, [Online]. Available: <http://www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/lte-long-term-evolution/lte-fdd-tdd-duplex.php>. [Acedido em 10 2013].
- [9] LTE University, “LTE University, Powered by award solutions,” 7 8 2012. [Online]. Available:

- http://lteuniversity.com/get_trained/expert_opinion1/b/lauroortigoza/archive/2012/08/07/frame-structures-in-lte-tdd-and-lte-fdd.aspx. [Acedido em 2 2014].
- [10] L. Zhang, “Network Capacity, Coverage Estimation and Frequency Planning of 3GPP Long Term Evolution,” Linköping, Sweden, 2010.
- [11] C. A. Leumaleu Djikeussi, “Reference Signals and Channel Estimation,” 2009.
- [12] A. Basir, “3GPP Long Term Evolution (LTE) - Primary and secondary synchronization signals,” 7 Junho 2012. [Online]. Available: <http://4g-lte-world.blogspot.pt/2012/06/primary-and-secondary-synchronization.html>. [Acedido em 11 2013].
- [13] Aby, “LTE SIMPLIFIED,” 9 5 2012. [Online]. Available: <http://ltesimplified.blogspot.pt/2012/05/lte-system-information.html>. [Acedido em 11 2013].
- [14] A. Basir, “3GPP Long Term Evolution (LTE) - Random Access Procedure in LTE,” 29 4 2013. [Online]. Available: <http://4g-lte-world.blogspot.pt/2013/04/random-access-procedure-rach-in-lte.html>. [Acedido em 11 2013].
- [15] I. Poole, “Radio-Electronics - MIMO Formats - SISO, SIMO, MISO, MU-MIMO,” Adrio Communications Ltd, [Online]. Available: <http://www.radio-electronics.com/info/antennas/mimo/formats-siso-simo-miso-mimo.php>. [Acedido em 11 2013].
- [16] J. Smith, “Agilent Technologies,” 26 8 2009. [Online]. Available: <http://www.agilent.com/about/newsroom/tmnews/background/N5106A/>. [Acedido em 11 2013].

- [17] Ericsson, “LTE KPIs Tutorial,” 2012.
- [18] Ericsson, “Self Organizing Networks,” 2012.
- [19] Learning LTE, “RSRP and RSRQ,” 2 2012. [Online]. Available: <http://lte-epc.blogspot.pt/2012/02/rsrp-and-rsrq.html>. [Acedido em 3 2014].
- [20] I. Pole, “Radio-Electronics - Self Organising Networks, SON,” Adrio Communications Ltd, [Online]. Available: <http://www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/self-organising-networks-son/basics-tutorial.php>. [Acedido em 2 2014].
- [21] 4G Americas, “Self-Optimizing Networks: The benefits of SON in LTE,” 2011.
- [22] Ericsson, “LTE Release 12,” 2013.
- [23] O. N. C. Yilmaz, “Self-Optimization of Coverage and Capacity in LTE using Adaptive Antenna Systems,” Filândia, 2010.
- [24] A. R. Beire, “Otimização de Modelo de Propagação utilizando Algoritmos Genéticos: Caso das Comunicações Móveis em Ferrovia,” Lisboa, 2013.
- [25] wikipédia, “Hill Climbing,” 23 05 2014. [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Hill_climbing. [Acedido em 06 2014].
- [26] wikipédia, “Simulated Annealing,” 15 5 2014. [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Simulated_Annealing. [Acedido em 6 2014].
- [27] wikipédia, “Genetic Algorithm,” 15 6 2014. [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Genetic_Algorithm. [Acedido em 6 2014].
- [28] G. A. Cavalcante, “Otimização de Modelos de Perdição da Perda de Propagação aplicaveis em 3,5 GHz utilizando algoritmos genéticos,” Rio

- Grande, Brasil, 2010.
- [29] M. Obitko, “Introduction to Genetic Algorithms,” 1998. [Online]. Available: <http://www.obitko.com/tutorials/genetic-algorithms/recommendations.php>. [Acedido em 8 2014].
- [30] M. Gao, “Intelligent Coverage Optimization with Multi-Objective Genetic Algorithm in Cellular System,” Sri Lanka, 2013.
- [31] A. Popov, “Genetic Algorithms for Optimization,” Hamburgo, 2005.
- [32] L. Z. Pedrini, “telecomHall,” 13 10 2011. [Online]. Available: <http://www.telecomhall.com/what-is-antenna-electrical-and-mechanical-tilt-and-how-to-use-it.aspx>. [Acedido em 2 2014].
- [33] L. Meyer, “Radio-Electronics - Antenna Technology in the LTE Era,” 10 2013. [Online]. Available: <http://www.radio-electronics.com/articles/antennas-propagation/antenna-technology-in-the-lte-era-96>. [Acedido em 11 2013].
- [34] W. Alexander, “Overshoots and Close-In Coverage,” Radio World, 2002.
- [35] Wikipédia, “Friis transmission equation,” 2 2014. [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Friis_transmission_equation. [Acedido em 3 2014].